LUCIA NAOMI ASADA

**Avaliação dos efeitos do recebimento do lodo de estação de
tratamento de água em sistema de tratamento de esgoto pelo
processo de lodo ativado com aeração prolongada**

São Paulo
2007

LUCIA NAOMI ASADA

**Avaliação dos efeitos do recebimento do lodo de estação de
tratamento de água em sistema de tratamento de esgoto pelo
processo de lodo ativado com aeração prolongada**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia

São Paulo
2007

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de junho de 2007.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Asada, Lucia Naomi

**Avaliação dos efeitos do recebimento do lodo de estação de tratamento de água em sistema de tratamento de esgoto pelo processo de lodo ativado com aeração prolongada / L.N. Asada. -- ed.rev. -- São Paulo, 2007.
189 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

1.Estações de tratamento de água 2.Processo de lodo ativado 3.Tratamento de esgotos sanitários 4.Tratamento biológico aeróbio I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária II.t.

AGRADECIMENTOS

MEUS SINCEROS AGRADECIMENTOS PELO AUXÍLIO, INCENTIVO, APOIO, APRENDIZADO, COMPREENSÃO, CONFIANÇA, AMIZADE E PROFISSIONALISMO RECEBIDO DE TODAS AS PESSOAS ENVOLVIDAS NESTA IMPORTANTE ETAPA DA MINHA VIDA. MUITO OBRIGADA!

Em especial:

Ao orientador Prof. Dr. Roque Passos Piveli, personalidade singular, profissional competente, professor dedicado e também agora Livre-Docente, fundamental no desenvolvimento de todo este projeto.

A Prof^a. Dra. Maria Aparecida Faustino Pires do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares por todo o auxílio e visão holística.

Ao Osvaldo Beltrame Filho, Gerente da Divisão de Controle Sanitário da Unidade de Negócios do Vale do Ribeira (SABESP), por toda a oportunidade oferecida ao projeto.

Ao Crysthian Antunes, Encarregado da SABESP da cidade de Juquitiba por todo seu apoio, empenho e amizade, ao sempre disposto operador da ETA João Laide Silva que nos auxiliou nas coletas de lodo de ETA e demais funcionários.

Ao Sr. Ademar Ruvolo e funcionários da oficina mecânica, elétrica e de hidráulica do Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH) por todo auxílio na manutenção dos equipamentos do sistema piloto.

A pesquisadora Dra Marycel Cotrim do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pelo apoio técnico nas análises de WDXRF e ICP/OES.

Aos funcionários da SABESP Luiz Fernando e Argeu, que tanto nos auxiliaram na limpeza e manutenção da estação elevatória de esgotos.

Ao Prof. Dr. Sidney Seckler Ferreira Filho e ao Prof. Dr. Pedro Alem Sobrinho, profissionais competentes e respeitados que compartilharam suas experiências e seus conhecimentos.

Aos técnicos do Laboratório de Saneamento Fábio Campos, Laerte Carvalho e funcionários da secretaria Ângela Mizuta, Iara Raposo, Odorico e Ricardo que sempre nos deram apoio.

A Sarah Ferreira, funcionária da Biblioteca da Engenharia Civil pelo auxílio na revisão das referências bibliográficas.

Aos amigos e colegas de trabalho da turma de pós-graduação, especialmente, Gilberto Sundefeld Jr, Carlos Rosário, Ricardo Costanzi por todo o trabalho em conjunto realizado e aos amigos Luciano Matos, Ruy Scanho e Adriana Marques.

A Prof^a Dra Ducinei Garcia, do Dep. de Física da UFSCar, personalidade ímpar que me iniciou na área de pesquisa científica.

A minha família Asada, base de tudo, meus pais Susumu Asada e Narcisa Asada e meus irmãos Michele Asada e Eduardo Asada.

Ao meu namorado Alexandre Colella, uma pessoa especial e importante na minha vida e que me deu suporte em todos os momentos.

Ao meu amigo Rogério Monma sempre me amparando em todos os momentos e aos meus demais amigos de infância, da UFSCar e outros que foram agregados pelo caminho e que completam a minha vida.

E a FUNDAÇÃO DE AMPARO A PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO (FAPESP) fundamental pela bolsa de mestrado concedida.

RESUMO

Nesta pesquisa o principal objetivo foi estudar a influência da disposição de lodo gerado em estação de tratamento de água (ETA), que utiliza sulfato de alumínio como coagulante, nos processos biológicos de tratamento de esgoto por lodo ativado com aeração prolongada. Para isso, uma estação piloto de fluxo contínuo foi operada com idade do lodo de 25 dias em duas condições: inicialmente alimentada somente com esgoto bruto e posteriormente com adição de lodo de ETA à base de alumínio de modo a haver acréscimo nos sólidos em suspensão (SS) do esgoto em 25, 50 e 100 mg/L. Os resultados obtidos mostraram que a principal consequência foi o aumento na produção de sólidos do sistema (acréscimos médios de 4,6% com 25 mg/L, 37,7% com 50 mg/L e 41,0% com 100 mg/L) e, portanto, na concentração média de SS no tanque de aeração, no decantador secundário e no lodo produzido em excesso. Como o decantador secundário operou com taxa de aplicação de sólidos abaixo da taxa limite não houve problema de arraste de sólidos pelo efluente final. Não houve interferências na remoção de $\text{DBO}_{5,20}$ (eficiência de remoção acima de 94%). O teste de consumo de oxigênio específico (TCO_a/SSV) e o exame microscópico do lodo não apontaram possíveis efeitos tóxicos desse lodo à microfauna existente. Não houve inibição no processo de nitrificação (eficiência média de remoção de nitrogênio Kjeldhal Total e de nitrogênio amoniacal acima de 95%). Houve aumento na concentração de DQO e de SS no efluente final pela própria contribuição do lodo da ETA sobre esses parâmetros. A remoção de fósforo foi observada apenas na forma solúvel com dosagem de 25 mg/L e 50 mg/L (eficiências de remoção de 9,1% e de 21,9% respectivamente). Esses resultados apontam que a disposição do lodo de ETA a base de alumínio em sistema de lodo ativado pode ser realizada sem interferências negativas sobre esses processos biológicos aeróbios.

Palavras-chaves: lodo ativado, lodo de ETA, disposição

ABSTRACT

The main purpose of this research was to study the influence of an alum-coagulated water treatment plant (WTP) sludge on the biological processes of wastewater treatment using extended aeration activated-sludge process. For this, a continuous-flow activated-sludge pilot plant was operated at solids retention time (SRT) value of 25 day under two conditions: initially, it was feeded only with sewage and next dosed with alum sludge in way to have an addition about 25, 50 and 100 mg of suspended solids (SS) per liter of incoming sewage. The results showed that the main consequence was the increase of solids production (average addition of 4,6% at 25 mg/L, 37,7% at 50 mg/L and 41% at 100 mg/L dosages) and therefore an increasing of average concentration of SS in aeration tank, secondary clarifier and waste-activated sludge. As the secondary clarifier operated under solids loading rate limit no solids were discharged in the clarifier effluent. There was no interference on BOD₅ removal (removal efficiency above 94%). The specific oxygen uptake rate (SOUR) and the microscopic observations did not show any possible toxic effects to the microbial population inhabiting the activated sludge system. There was no inhibition in nitrification process (average efficiency of Total Kjeldahl nitrogen and ammonia nitrogen removal above 95%). There was an increase of COD and SS in final effluent due to contribution of WTP residuals on these parameters. Phosphorus removal was observed only in soluble form with doses of 25 mg/L and 50 mg/L (removal efficiency of 9,1% and 21,9% respectively). These results indicate that disposal of WTP alum sludge in activated-sludge system can be done without any adverse effects on these aerobic biological processes.

Keywords: activated sludge, WTP residual, disposal

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática das unidades envolvidas no processo de lodo ativado	5
Figura 2 - Curva de crescimento típico das bactérias em sistema descontínuo em termos de variação da massa de microrganismos com o tempo e a DBO remanescente	6
Figura 3 - Esquema de ETE por lodo ativado com aeração prolongada	16
Figura 4 - Pontos de geração de resíduos em uma ETA convencional.....	18
Figura 5 - Disposição final de lodos de ETAs nos Estados Unidos	26
Figura 6 - Pontos de geração, coleta e tratamento do esgoto utilizado na pesquisa	38
Figura 7 - Representação fotográfica da unidade piloto de lodo ativado. (a) vista frontal do tanque de aeração e decantador secundário, (b) tanque com solução de barrilha e de lodo de ETA, (c) vista do painel com válvula de controle de ar e controlador do pH e (d) vista lateral do decantador secundário	39
Figura 8 - Mapa da bacia hidrográfica do Rio Ribeira de Iguape/Litoral Sul	43
Figura 9 - O processo de tratamento convencional de água da ETA de Juquitiba (SP)	43
Figura 10 - Representação fotográfica do procedimento de limpeza do decantador na ETA da cidade de Juquitiba. (a) canal de passagem da água floculada para o decantador com o lodo acumulado ao fundo. (b) operador lavando com água pressurizada as placas de aceleração do decantador	44
Figura 11 - Esquema geral da unidade piloto de lodo ativado e os pontos de coleta das amostras.....	45
Figura 12 - Séries temporais de: (a) concentração de DBO afluente e efluente ao sistema (b) eficiência de remoção associada para a fase sem adição de lodo de ETA.....	53
Figura 13 - Séries temporais de: (a) concentração de DBO afluente e efluente ao sistema, (b) concentração efluente total e filtrado e (c) eficiência de remoção associada para a fase sem adição de lodo de ETA.....	54

Figura 14 - Séries temporais de: (a) concentração de DQO afluyente e efluente ao sistema e (b) eficiência de remoção associada para fase sem lodo de ETA.....	55
Figura 15 - Diagrama <i>box plot</i> para: (a) concentração de DQO afluyente e efluente ao sistema, (b) concentração de DQO do efluente total e filtrado e (c) a eficiência de remoção associada para fase sem lodo de ETA.....	56
Figura 16 - Séries temporais de: (a) concentração de SS afluyente e efluente ao sistema para a fase sem adição de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada	60
Figura 17 – Diagrama <i>box plot</i> de: (a) concentração de SS afluyente e efluente ao sistema, (b) concentração SS efluente e (c) eficiência de remoção associada para a fase sem adição de lodo de ETA.....	61
Figura 18 - Diagrama <i>box plot</i> das frações dissolvida e em suspensão e também a fração orgânica e inorgânica dos ST no lodo biológico do sistema para a fase sem adição de lodo de ETA.....	62
Figura 19 - Diagrama <i>box plot</i> da concentração de SS e a fração orgânica e inorgânica no lodo de retorno do sistema para a fase sem adição de lodo de ETA.....	62
Figura 20 - Série temporal de: (a) concentração de N-NTK afluyente e efluente para fase sem adição de lodo de ETA.....	64
Figura 21 - Séries temporais de: (a) concentração de N-NH ₃ afluyente e efluente e (b) eficiência de remoção de N-NH ₃ para fase sem adição de lodo de ETA.....	65
Figura 22 - Diagrama <i>box plot</i> de: (a) concentração de N-NTK afluyente e N-NH ₃ afluyente e efluente ao sistema e (b) eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal para fase sem adição de lodo de ETA.....	66
Figura 23 - Série temporal de concentração de fósforo total afluyente e efluente ao sistema	67
Figura 24 - Séries temporais de concentração de fósforo solúvel afluyente e efluente ao sistema	67
Figura 25 - Diagramas <i>box plot</i> de concentração de fósforo total e solúvel afluyente e efluente ao sistema.....	68

Figura 26 - Valores de OD em função do tempo utilizado para determinação da TCO _a no lodo ativado na fase sem adição de lodo de ETA.....	70
Figura 27 - Exame microscópico do lodo do tanque de aeração com presença de: (a) e (b) protozoários pedunculados, (c) anelídeos e (d) protozoários ciliados livres entre os flocos	71
Figura 28 - Séries temporais de: (a) concentração de DBO afluente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada	76
Figura 29 - Diagrama <i>box plot</i> de: (a) concentração de DBO afluente e efluente, (b) concentração de DBO efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada	77
Figura 30 - Séries temporais de: (a) concentração de DQO afluente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada	78
Figura 31 - Diagrama <i>box plot</i> de: (a) concentração de DQO afluente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA, (b) concentração de DQO efluente e (b) eficiência de remoção associada.....	79
Figura 32 - Séries temporais de: (a) concentração de SS afluente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada	82
Figura 33 - Diagrama <i>box plot</i> de: (a) concentração de SS afluente e efluente, (b) concentração de SS efluente e (c) eficiência de remoção associada com 25 mg/L de lodo de ETA	83
Figura 34 - Diagrama <i>box plot</i> da fração dissolvida e em suspensão e também da fração orgânica e inorgânica do lodo biológico com 25 mg/L de lodo de ETA.....	84
Figura 35 - Séries temporais de: (a) concentração de nitrogênio total Kjeldahl afluente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada.....	86
Figura 36 - Séries temporais de: (a) concentração de nitrogênio amoniacal afluente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada.....	87

Figura 37 - Diagrama <i>box plot</i> de: (a) concentração de nitrogênio NKT e NH_3 afluente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada.....	88
Figura 38 - Séries temporais de concentração de fósforo total afluente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA.....	89
Figura 39 - Séries temporais de concentração de fósforo solúvel afluente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA	89
Figura 40 - Diagrama <i>box plot</i> de concentração de fósforo total e solúvel afluente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA	90
Figura 41 - Valores de OD em função do tempo utilizado para determinação da TCO_a no lodo ativado com 25 mg SST/L de lodo de ETA	91
Figura 42 - Exame microscópico do lodo do tanque de aeração com presença de: (a) protozoário pedunculado, (b) anelídeo, (c) rotífero e (d) protozoário ciliado livre	93
Figura 43 - Séries temporais de: (a) concentração de $\text{DBO}_{5,20}$ no afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada	99
Figura 44 - Diagrama <i>box plot</i> de: (a) concentração de $\text{DBO}_{5,20}$ no afluente e efluente, (b) concentração de $\text{DBO}_{5,20}$ no efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA e (c) eficiência de remoção associada	100
Figura 45 - Séries temporais de: (a) concentração de DQO afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada	101
Figura 46 - Diagrama <i>box plot</i> de: (a) concentração de DQO no afluente e efluente, (b) concentração de DQO no efluente total e filtrado ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA e (c) eficiência de remoção associada	102
Figura 47 - Série temporais de: (a) concentração de SS afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada	105
Figura 48 - Diagrama <i>box plot</i> de: (a) concentração de SS afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA e (b) concentração de SS efluente ao sistema e (c) eficiência de remoção associada.....	106

Figura 49 - Diagrama <i>box plot</i> das frações dissolvida e em suspensão e também das frações orgânica e inorgânica do lodo biológico com 50 mg/L de lodo de ETA.....	107
Figura 50 - Diagrama <i>box plot</i> da fração dissolvida e em suspensão e também da fração orgânica e inorgânica do lodo de retorno com 50 mg/L de lodo de ETA.....	108
Figura 51 - Séries temporais de: (a) concentração de nitrogênio Kjeldahl total afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada.....	110
Figura 52 - Séries temporais de: (a) concentração de nitrogênio amoniacal afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada.....	111
Figura 53 - Diagrama <i>box plot</i> de: (a) concentração de nitrogênio NKT e amoniacal afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada	112
Figura 54 - Séries temporais de concentração de fósforo total afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA.....	113
Figura 55 - Séries temporais de concentração de fósforo solúvel afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA	113
Figura 56 - Diagrama de <i>box plot</i> de concentração de fósforo total e solúvel afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA.....	114
Figura 57 - Valores de OD em função do tempo utilizado para determinação da TCO_a no lodo ativado\ com 50 mg SS/L de lodo de ETA	116
Figura 58 - Exame microscópico do lodo do tanque de aeração com presença de: (a) protozoário pedunculado, (b) anelídeo, (c) rotífero e (d) protozoário ciliado livre	117
Figura 59 - Séries temporais de: (a) concentração de DQO no afluente e efluente ao sistema com 100 mg/L de lodo de ETA e (b) a eficiência de remoção associada.....	121
Figura 60 - Diagrama <i>box plot</i> de: (a) concentração de DQO no afluente e efluente, (b) concentração de DQO no efluente total e filtrado ao sistema com 100 mg/L de lodo de ETA e (b) a eficiência de remoção associada	122

Figura 61: Série temporais de: (a) concentração de SS afluente e efluente ao sistema com 100 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada	125
Figura 62 - Diagrama <i>box plot</i> de: (a) concentração de SS afluente e efluente ao sistema com 100 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada	126
Figura 63 - Diagrama <i>box plot</i> da fração dissolvida e em suspensão e também da fração orgânica e inorgânica dos ST do lodo biológico do sistema com 100 mg/L de lodo de ETA	127
Figura 64 - Diagrama <i>box plot</i> de: (a) concentração de SS no lodo de retorno do sistema com 100 mg/L de lodo de ETA.....	127
Figura 65 - Séries temporais de: (a) concentração de Nitrogênio Total Kjeldahl afluente e efluente ao sistema com 100 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada.....	129
Figura 66 - Séries temporais de: (a) concentração de nitrogênio amoniacal afluente e efluente ao sistema com 100 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada.....	130
Figura 67 - Diagrama de <i>box plot</i> de: (a) concentração de nitrogênio NKT e amoniacal afluente e efluente ao sistema com 100 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada	131
Figura 68 - Séries temporais de concentração de fósforo total afluente e efluente ao sistema com 100 mg/L de lodo de ETA.....	132
Figura 69 - Séries temporais de concentração de fósforo solúvel afluente e efluente ao sistema com 100 mg/L de lodo de ETA	132
Figura 70 - Diagrama <i>box-plot</i> de: (a) DBO do efluente com as diferentes dosagens de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada	134
Figura 71 - Diagrama <i>box-plot</i> para: (a) DQO do efluente total, (b) DQO do efluente filtrado com as diferentes dosagens de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada.....	135
Figura 72 - Diagrama <i>box-plot</i> para IVL ₃₀ do lodo com as diferentes dosagens de lodo de ETA.....	138
Figura 73 - Diagrama <i>box-plot</i> para o volume ocupado pelo lodo na proveta (mL/L) com as diferentes dosagens de lodo de ETA.....	139

Figura 74 - Diagrama <i>box-plot</i> das concentrações de SS no lodo do tanque de aeração com as diferentes dosagens de lodo de ETA	139
Figura 75 - Diagrama <i>box-plot</i> das concentrações de SS no lodo de retorno do sistema com as diferentes dosagens de lodo de ETA.....	140
Figura 76 - Diagrama <i>box-plot</i> de: (a) SS do efluente ao sistema com as diferentes dosagens de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada	141
Figura 77 - Diagrama <i>box-plot</i> de: (a) sólidos totais e (b) sólidos dissolvidos do efluente ao sistema com as diferentes dosagens de lodo de ETA	142
Figura 78 - Diagrama <i>box-plot</i> de: (a) relação SSV/SST do lodo do tanque de aeração (b) relação SSV/SSTno efluente final com as diferentes dosagens de lodo de ETA	143
Figura 79 - Diagrama <i>box-plot</i> de: (a) nitrogênio Kjeldahl Total efluente ao sistema e (b) eficiência de remoção com as diferentes dosagens de lodo de ETA.....	144
Figura 80 - Diagrama <i>box-plot</i> para : (a) nitrogênio amoniacal efluente ao sistema e (b) eficiência de remoção com as diferentes dosagens de lodo de ETA.....	145
Figura 81 - Diagrama <i>box-plot</i> para fósforo total do efluente ao sistema com as diferentes dosagens de lodo de ETA.....	146
Figura 82 - Diagrama <i>box-plot</i> de fósforo solúvel efluente ao sistema com as diferentes dosagens de lodo de ETA.....	147
Figura 83 - Diagrama esquemático dos fluxos de entrada e saída de sólidos no sistema	154

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Principais bactérias encontradas no sistema de lodo ativado	7
Tabela 2 - Microrganismos indicadores das condições de depuração	8
Tabela 3 - Variantes do processo de lodo ativado em função da idade do lodo	14
Tabela 4 - Alguns parâmetros de projeto do reator biológico para remoção de carbono.....	14
Tabela 5 - Alguns coeficientes cinéticos e relações básicas para o cálculo da remoção de DBO em sistema de lodo ativado	15
Tabela 6 - Características do lodo a base de alumínio/ferro	19
Tabela 7 - Algumas características dos lodos gerados em ETAs	21
Tabela 8 - Produção de lodo de ETA de águas com diferentes valores de turbidez.....	23
Tabela 9 - Programa de monitoramento do sistema piloto	46
Tabela 10 - Principais métodos analíticos e infra-estrutura disponível (continua).....	47
Tabela 11 - Principais métodos analíticos e infra-estrutura disponível (conclusão) ..	48
Tabela 12 - Dados do monitoramento do sistema sem adição de lodo de ETA.....	51
Tabela 13 - Resultados de $DBO_{5,20}$ e DQO sem adição de lodo de ETA	52
Tabela 14 - Resultados de pH e alcalinidade para fase sem adição de lodo de ETA.....	57
Tabela 15 - Resultados de sólidos em suspensão (totais, voláteis e fixos) sem adição de lodo de ETA	58
Tabela 16 - Resultados de SS, SSV, SSF do lodo de retorno sem adição de lodo de ETA.....	59
Tabela 17 - Resultados da série nitrogenada e do fósforo (total e solúvel) sem adição de lodo de ETA	63
Tabela 18 - Valores de OD em função do tempo obtidos durante o ensaio da determinação da taxa de consumo de oxigênio para fase sem adição de lodo de ETA.....	69
Tabela 19 - Resultado da TCO_a no lodo do tanque de aeração, a relação TCO_a/SSV e a concentração de SSV utilizada na fase sem adição de lodo de ETA.....	70

Tabela 20 - Caracterização físico-química do lodo de ETA para a primeira dosagem (25 mg/L) (continua).....	72
Tabela 21 - Caracterização físico-química do lodo de ETA para a primeira dosagem (25 mg/L) (conclusão).....	73
Tabela 22 - Caracterização semi-quantitativa por WDXRF do lodo de ETA para a primeira dosagem.....	73
Tabela 23 - Dados do monitoramento operacional com adição de 25 mg/L de lodo de ETA.....	74
Tabela 24 - Resultados de DBO _{5,20} e DQO na primeira dosagem (25 mg/L).....	75
Tabela 25 - Resultados de pH e alcalinidade na primeira dosagem de lodo de ETA.....	80
Tabela 26 - Resultados de sólidos em suspensão (totais, voláteis e fixos) na primeira dosagem de lodo de ETA (continua)	80
Tabela 27 - Resultados de sólidos em suspensão (totais, voláteis e fixos) na primeira dosagem de lodo de ETA (conclusão).....	81
Tabela 28 - Resultados de SS, SSV, SSF do lodo de retorno na primeira dosagem de lodo de ETA	81
Tabela 29 - Resultados da série nitrogenada e do fósforo (total e solúvel) na primeira dosagem (25 mg/L).....	85
Tabela 30 - Valores de OD em função do tempo obtidos durante o ensaio da determinação da taxa de consumo de oxigênio do lodo com a primeira dosagem.....	91
Tabela 31 - Resultado da TCO _a no lodo do tanque de aeração, a relação TCO _a /SSV e a concentração de SSV utilizada na primeira dosagem (25mg/L)	92
Tabela 32 - Caracterização físico-química do lodo de ETA para a segunda dosagem.....	94
Tabela 33 - Caracterização semi-quantitativa por WDXRF do lodo de ETA para a segunda dosagem	95
Tabela 34 - Concentrações de metais e elementos-traços detectadas por ICP-OES/AA do lodo de ETA (continua).....	95
Tabela 35 - Concentrações de elementos traços detectadas por ICP-OES/AA do lodo de ETA (conclusão)	96

Tabela 36 - Dados do monitoramento do sistema na segunda dosagem (50mg/L) ..	97
Tabela 37 - Resultados de $\text{DBO}_{5,20}$ e DQO para a segunda dosagem (50 mg/L)	98
Tabela 38 - Resultados de pH e alcalinidade para a segunda dosagem (50 mg/L)	103
Tabela 39 - Resultados de sólidos em suspensão para a segunda dosagem (50mg/L)	103
Tabela 40 - Resultados de SS, SSV, SSF do lodo de retorno para a segunda dosagem.....	104
Tabela 41 - Resultados da série nitrogenada e do fósforo (total e solúvel) na segunda dosagem (continua)	108
Tabela 42 - Resultados da série nitrogenada e do fósforo (total e solúvel) na segunda dosagem (conclusão).....	109
Tabela 43 - Valores de OD em função do tempo obtidos durante o ensaio da determinação da taxa de consumo de oxigênio do lodo com a segunda dosagem (50 mg/L).....	115
Tabela 44 - Resultado da TCO_a no lodo do tanque de aeração, a relação TCO_a/SSV e a concentração de SSV utilizada na segunda dosagem (50 mg/L)	116
Tabela 45 - Caracterização físico-química do lodo de ETA adicionado na terceira dosagem.....	118
Tabela 46 - Dados do monitoramento do sistema da terceira dosagem (100 mg/L)	119
Tabela 47 - Resultados de $\text{DBO}_{5,20}$ e DQO na terceira dosagem (100mg/L)	120
Tabela 48 - Resultados de pH e alcalinidade na terceira dosagem (100mg/L)	123
Tabela 49 - Resultados de sólidos em suspensão (totais, voláteis e fixos) para a terceira dosagem.....	123
Tabela 50 - Resultados de SS, SSV, SSF do lodo de retorno para a terceira dosagem (100 mg/L).....	124
Tabela 51 - Resultados da série nitrogenada e do fósforo (total e solúvel) na terceira dosagem (100 mg/L).....	128
Tabela 52 - Valores da relação TCO_a/SSV no lodo do tanque de aeração	137
Tabela 53 - Dados do sistema utilizados para o cálculo de produção de sólidos....	149
Tabela 54 - Produção de sólidos (SS) do esgoto para o balanço de massa teórico.....	150

Tabela 55 - Produção de sólidos (SS) do lodo de ETA para o balanço de massa teórico.....	150
Tabela 56 - Produção total afluyente de sólidos (SS) ao sistema para o balanço de massa teórico	151
Tabela 57 - Cálculo de sólidos biológicos produzidos no reator para o balanço de massa teórico	152
Tabela 58 - Produção total de sólidos (afluyente + reator) no sistema para o balanço de massa teórico.....	152
Tabela 59 - Resumo da produção teórica dos sólidos em suspensão (SS) do sistema	153
Tabela 60 - Produção total afluyente de sólidos (SS) ao sistema para o balanço de massa real	154
Tabela 61 - Produção real total de sólidos (SS) no sistema.....	155
Tabela 62 - Comparação entre balanço teórico e real dos sólidos em suspensão do sistema	156

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ETA	Estação de tratamento de água
ETE	Estação de tratamento de esgoto
ASCE	American Society of Civil Engineers
AWWA	American Water Works Association
AWWARF	American Water Works Association Research Foundation
IVL ₃₀	Índice volumétrico do lodo de 30 minutos
TCO _a	Taxa de consumo de oxigênio aparente
WDXRF	Espectrometria de fluorescência de raios-X
ICP-OES/AA	Espectrometria de emissão ótica com fonte de plasma e argônio induzido
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CRUSP	Centro Residencial da Universidade de São Paulo
CTH	Centro Tecnológico de Hidráulica
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
NTK	Nitrogênio Total Kjeldahl
ST	Sólidos Totais
SF	Sólidos Fixos
SV	Sólidos Voláteis
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
SSF	Sólidos Suspensos Fixos
SSTA	Sólidos Suspensos Totais do Tanque de Aeração

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo geral.....	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. REVISÃO DA LITERATURA	4
3.1. Tratamento de esgotos pelo processo de lodo ativado.....	4
3.1.1. Aspectos gerais.....	4
3.1.2. Microrganismos atuantes no processo de lodo ativado.....	7
3.1.3. Fatores ambientais que influenciam o processo de lodo ativado	9
3.1.4. Problemas de separação de sólidos	11
3.1.5. Variantes do processo.....	13
3.2. Os resíduos gerados nas estações de tratamento de água (ETAs)	17
3.2.1. Resíduos da água de lavagem dos filtros	18
3.2.2. Lodos gerados nos decantadores de ETAs	19
3.2.3. Características gerais dos resíduos gerados nas ETAs.....	20
3.2.4. Produção de lodo em ETAs	22
3.3. Tratamento do lodo gerado em ETAs.....	24
3.3.1. Aspecto histórico.....	24
3.3.2. Tecnologias de tratamento do lodo de ETA	25
3.3.3. Disposição do lodo de ETA em ETE	27
4. MATERIAL E MÉTODOS	36
4.1 Estação piloto de tratamento de esgotos por lodo ativado	38
4.1.1. Descrição da unidade piloto	39
4.1.2. Operação do sistema	41
4.2. Lodo de ETA utilizado no experimento	42
4.3. Caracterização físico-química e o programa de monitoramento.....	45
4.3.1. Métodos analíticos empregados	47
4.4. Outros ensaios em laboratório	49
4.4.1. Taxa de consumo de oxigênio aparente (TCO_a)	49

4.4.2. Microscopia óptica.....	49
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
5.1 Operação do sistema antes do lançamento do lodo de ETA	50
5.1.1. Variáveis controladas em campo	50
5.1.2. Resultados de $\text{DBO}_{5,20}$ e DQO	52
5.1.3. Resultado de pH e alcalinidade.....	57
5.1.4. Resultados de concentração de sólidos.....	58
5.1.5. Resultados de nitrogênio e fósforo.....	63
5.1.6. Taxa de consumo de oxigênio aparente (TCO_a)	68
5.1.7. Microscopia óptica do lodo.....	71
5.2. Operação do sistema recebendo a primeira dosagem de lodo de ETA (25 mg/L)	72
5.2.1. Caracterização do lodo de ETA adicionado	72
5.2.2. Variáveis controladas em campo	74
5.2.3. Resultados de $\text{DBO}_{5,20}$ e DQO	75
5.2.4. Resultados de pH e alcalinidade.....	80
5.2.5. Resultados de concentração de sólidos.....	80
5.2.6. Resultados de nitrogênio e fósforo.....	85
5.2.7. Taxa de consumo de oxigênio aparente (TCO_a)	91
5.2.8. Microscopia óptica do lodo.....	93
5.3. Operação do sistema recebendo a segunda dosagem de lodo de ETA (50mg/L)	94
5.3.1. Caracterização do lodo de ETA adicionado	94
5.3.2. Variáveis controladas em campo	97
5.3.3. Resultados de $\text{DBO}_{5,20}$ e DQO	98
5.3.4. Resultados de pH e alcalinidade.....	103
5.3.5. Resultados de concentração de sólidos.....	103
5.3.6. Resultados de nitrogênio e fósforo.....	108
5.3.7. Taxa de consumo de oxigênio aparente (TCO_a)	114
5.3.8. Microscopia óptica do lodo.....	117
5.4. Operação do sistema recebendo a terceira dosagem de lodo de ETA (100 mg/L)	118

5.4.1. Caracterização do lodo de ETA adicionado	118
5.4.2. Variáveis controladas em campo	119
5.4.3. Resultados de DBO _{5,20} e DQO	120
5.4.4. Resultados de pH e alcalinidade	123
5.4.5. Resultados de concentração de sólidos	123
5.4.6. Resultados de nitrogênio e fósforo	128
5.5. Estudos comparativos	133
5.5.1. Efeitos sobre a remoção da matéria orgânica	133
5.5.2. Efeitos sobre a sedimentabilidade do lodo biológico	137
5.5.3. Efeitos sobre a nitrificação	144
5.5.4. Efeitos sobre a remoção de fósforo	146
5.5.5. Efeitos sobre a produção de lodo (balanço de massa) no sistema	149
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	158
REFERÊNCIAS	162
ANEXO 1 – DADOS PARA CÁLCULO DA PRODUÇÃO DE LODO DE ETA DO MUNICÍPIO DE JUQUITIBA (SP)	167
ANEXO 2 – DADOS DO PERÍODO DE OPERAÇÃO SEM ADIÇÃO DE LODO DE ETA	168
ANEXO 3 – DADOS DO PERÍODO DE OPERAÇÃO COM ADIÇÃO DA PRIMEIRA DOSAGEM DE LODO DE ETA (25 mg/L)	176
ANEXO 4 - DADOS DO PERÍODO DE OPERAÇÃO COM ADIÇÃO DA SEGUNDA DOSAGEM DE LODO DE ETA (50 mg/L)	180
ANEXO 5 - DADOS DO PERÍODO DE OPERAÇÃO COM ADIÇÃO DA TERCEIRA DOSAGEM DE LODO DE ETA (100 mg/L)	184
ANEXO 6 – EQUAÇÕES PARA O CÁLCULO DO BALANÇO DE MASSA NO SISTEMA	187

1. INTRODUÇÃO

As estações de tratamento de água no Brasil estão enfrentando um problema que havia sido postergado até recentemente, o tratamento do lodo gerado. A prática mais comum era a disposição desse rejeito diretamente ao corpo d'água mais próximo. Porém, com as preocupações ambientais cada vez mais evidentes as empresas de saneamento e as universidades passaram a estudar medidas e práticas ambientalmente corretas.

No Estado de São Paulo essa tendência pode ser observada por ações que vêm sendo tomadas pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) em relação ao lodo produzido nas estações de tratamento de água para abastecimento (ETAs). Esses lodos gerados ainda têm sido lançados diretamente em córregos e rios próximos às estações, sem qualquer tipo de tratamento, porém a Sabesp vem realizando estudos de viabilidade técnica e econômica para a utilização benéfica do lodo, tais como a incorporação na fabricação de cerâmica vermelha (tijolos, telhas e manilhas) e na selagem de células de aterro sanitário, obtendo resultados bastante promissores (SABESP, 2003).

Uma prática que está em evidência é a disposição do lodo de ETA nas estações de tratamento de esgoto (ETEs), uma vez que é uma alternativa que dispensa a implantação da linha de tratamento do lodo onde o custo pode variar de 20% a 60% dos custos operacionais de uma estação de tratamento (ANDREOLI, 2001). A SABESP já iniciou pesquisa sobre a disposição do lodo de ETA em ETEs com o caso da ETE do município de Franca (MELO et al, 2004). O lodo de ETA (cloreto férrico) é recebido em batelada pelo sistema de lodo ativado convencional mediante uma programação antecipada diretamente para um decantador primário reservado.

O que se diz a respeito dessa prática é que não se está resolvendo o problema, apenas transferindo o gerenciamento e disposição do lodo de ETA para a ETE. Contudo, é preciso levar em consideração que muitas ETAs não tem espaço físico para a construção da linha de tratamento ou estão inseridas em áreas urbanas sem condições de ampliação, e no sistema de tratamento de esgotos, uma ETE, geralmente, conta com uma infra-estrutura montada para o tratamento do lodo

devido às grandes quantidades geradas pelos processos biológicos de tratamento e também pela tradição em operação com lodo (JANUÁRIO, 2005). Além disso, não deixa de ser uma alternativa para o destino do lodo evitando seu despejo direto em cursos d' água até que sejam implantadas soluções melhores.

Tendo em vista que esta disposição é uma alternativa em potencial para uma destinação adequada do lodo de ETA, muitas pesquisas já foram realizadas buscando verificar os efeitos do lançamento em ETEs em unidades de decantação primária, na digestão de lodo e em lagoas (aeradas, anaeróbias e facultativas).

No Estado de São Paulo, além dos sistemas de tratamento de esgotos sanitários por lagoas de estabilização, o processo de tratamento por lodo ativado é um dos mais utilizados. Então se detectou a necessidade em estudar os efeitos sobre esses sistemas, porém adotando a variante do tipo aeração prolongada, que por não possuir decantador primário, o impacto da disposição do lodo de ETA é gerado direto nos processos biológicos.

Desta maneira, para a realização deste trabalho, foi escolhido o processo de tratamento de esgotos por lodos do tipo aeração prolongada representado por uma estação piloto que passará a receber diversas dosagens de lodo de ETA diretamente no tanque de aeração e o efluente gerado no sistema será analisado em cada etapa com intuito de verificar os possíveis efeitos exercidos sobre os processos biológicos de tratamento.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar a influência da disposição dos lodos gerados em ETA sobre o processo biológico de tratamento de esgoto por lodo ativado com aeração prolongada.

2.2. Objetivos específicos

Investigar experimentalmente os principais efeitos da introdução de lodo de ETA sobre os seguintes aspectos do sistema de lodo ativado:

- Os processos de floculação biológica quantitativamente (concentração de sólidos suspensos e o grau de mineralização do lodo) e qualitativamente (observação por microscopia dos flocos de lodo ativado);
- O controle operacional do sistema, como a idade do lodo;
- A sedimentabilidade do lodo por meio de índice volumétrico do lodo (IVL_{30});
- A microfauna por meio de taxa de consumo de oxigênio aparente (TCO_a);
- As características do efluente final mensurado por meio das análises de $DBO_{5,20}$, DQO, pH e alcalinidade, série nitrogenada, fósforo total e solúvel e série de sólidos;
- A produção de lodo em excesso.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Inicialmente será revisada a literatura sobre o processo de tratamento de esgotos escolhido para este trabalho, no caso, o processo de lodo ativado. Posteriormente será apresentada revisão sobre os lodos gerados nas estações de tratamento de água e a literatura a respeito dos métodos de tratamento mais utilizados para esses resíduos, especialmente a disposição desses lodos nos sistemas de tratamento de esgotos.

3.1. Tratamento de esgotos pelo processo de lodo ativado

Este tipo de tratamento é utilizado amplamente para esgotos domésticos e despejos industriais. Pode ser projetado para a remoção de material orgânico (tratamento secundário) e para remoção dos nutrientes, nitrogênio e fósforo (tratamento terciário).

É bastante requisitado quando se necessita de maiores eficiências de tratamento e maior flexibilidade de operação, porém apresenta algumas desvantagens como operação delicada e necessidade de completo controle de laboratório (JORDÃO e PESSOA, 2005).

3.1.1. Aspectos gerais

O processo de lodo ativado pode ser definido como um sistema onde uma massa biológica que cresce e floclula é constantemente recirculada e colocada em contato com a matéria orgânica de uma água residuária afluyente em presença de oxigênio. O oxigênio pode ser fornecido por bolhas de ar injetados por difusores dentro da mistura lodo-líquido sob condições de turbulência ou por aeradores mecânicos de superfície ou outros tipos de unidades de aeração. Este sistema possui uma unidade de aeração seguida por uma unidade de separação dos sólidos

de onde parte desse sólido é retornado ao tanque de aeração para mistura com águas residuárias afluentes a este e o restante é descartado do sistema (ALEM SOBRINHO, 1981).

A Figura 1 mostra uma representação esquemática do sistema de lodo ativado.

Figura 1 - Representação esquemática das unidades envolvidas no processo de lodo ativado
Fonte: ALEM SOBRINHO, 1981

As reações bioquímicas de utilização do substrato da água residuária pela biomassa (microrganismos) ocorrem no tanque de aeração. No decantador secundário ocorre a sedimentação dessa biomassa permitindo que o efluente final saia clarificado. A biomassa consegue ser facilmente separada no decantador secundário devido à sua propriedade de flocular. Isso se deve ao fato das bactérias (principal grupo de microrganismos) possuírem uma matriz gelatinosa, que permite a aglutinação das bactérias e outros microrganismos, como protozoários (VON SPERLING, 2002).

Essas reações bioquímicas que ocorrem no tanque de aeração dizem respeito ao metabolismo dos microrganismos (utilização do substrato pelos mesmos). Parte do material orgânico metabolizado é transformado quimicamente para produtos finais estáveis, num processo acompanhado pela liberação de energia e outra parte é transformada em nova massa celular (VAN HAANDEL, 1999).

Os microrganismos que utilizam a matéria orgânica como fonte de carbono são denominados heterótrofos e aqueles que utilizam dióxido de carbono são denominados autótrofos.

O crescimento bacteriano em decorrência da remoção do substrato pode ser ilustrado pela Figura 2, um gráfico típico do crescimento das bactérias em sistema descontínuo em termos de variação da massa de microrganismos com o tempo e a remoção de DBO remanescente.

Figura 2 - Curva de crescimento típico das bactérias em sistema descontínuo em termos de variação da massa de microrganismos com o tempo e a DBO remanescente

Fonte: adaptado de ALEM SOBRINHO, 1981

A primeira fase é chamada fase do crescimento logarítmico. Há excesso de alimento, então, o crescimento das bactérias só depende da habilidade dos microrganismos em utilizarem o substrato. A segunda fase é o do crescimento a taxa decrescente. Nesta fase, a limitação de alimento diminui a taxa de crescimento. A última fase é a chamada fase endógena. Os microrganismos são forçados a metabolizar seu próprio protoplasma, pois o alimento está disponível ao mínimo. Durante esta fase pode ocorrer a chamada lise celular, ou seja, a destruição das células por danos ou rupturas da membrana celular e os nutrientes das células

mortas podem servir de alimento para as células remanescentes, este fenômeno é conhecido como crescimento oculto (ALEM SOBRINHO, 1981).

Entre as principais variantes dos sistemas de lodo ativado, o convencional trabalha com a fase de crescimento a taxa decrescente (Fase II) e o aeração prolongada trabalha com a fase endógena do crescimento bacteriano (Fase III).

Na seção seguinte serão identificados os principais microrganismos responsáveis pelos processos biológicos nestes sistemas.

3.1.2. Microrganismos atuantes no processo de lodo ativado

A massa biológica contida no reator do processo de lodo ativado é constituída de agregados de microrganismos, material coloidal orgânico e inorgânico, e material particulado onde todos estão unidos numa matriz orgânica compacta. Um grande número de protozoários estão fixos aos flocos (pedunculados) e também ciliados livre-natantes e flagelados são encontrados na massa líquida e dentro da matriz do floco (HORAN, 1990).

A população dominante nesse processo são as bactérias gram-negativas. Todas, com exceção das bactérias nitrificantes que são autotróficas, são organismos heterotróficos e os principais gêneros estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais bactérias encontradas no sistema de lodo ativado

Gênero	Função
<i>Pseudomonas</i>	Remoção de carboidratos, produção de exopolímeros, desnitrificação
<i>Zooglea</i>	Produção exopolímero, formação do floco
<i>Bacillus</i>	Degradação de proteína
<i>Athrobacter</i>	Degradação de carboidrato
<i>Microthrix</i>	Degradação de gordura, crescimento filamentoso
<i>Nocardia</i>	Crescimento filamentoso, formação de espuma e escuma
<i>Acinetobacter</i>	Remoção de fósforo
<i>Nitrosomonas</i>	Nitrificação
<i>Nitrobacter</i>	Nitrificação
<i>Achromobacter</i>	Desnitrificação

Fonte: HORAN, 1990

Os protozoários também têm importante função nos processos biológicos aeróbios por consumirem bactérias livres e partículas coloidais, auxiliando na clarificação do efluente final. Protozoários requerem um tempo de residência celular (idade do lodo) maior que o das bactérias heterotróficas, preferem concentrações de oxigênio dissolvido maior que 1,0 mg/L e são sensíveis a substâncias tóxicas. Sua presença é um bom indicador de que o processo encontra-se estável e sem problemas operacionais.

Rotíferos também podem ser encontrados no lodo ativado, assim como nematóides e outros microrganismos multicelulares. Estes organismos ocorrem em idade do lodo elevada e sua importância ainda não foi bem definida (METCALF e EDDY, 2003).

Segundo Vazzoler et al (1989) algumas espécies são consideradas indicadoras das condições de depuração do sistema de tratamento (Tabela 2) e sua identificação auxilia a manutenção de boas condições de operação dos sistemas.

Tabela 2 - Microrganismos indicadores das condições de depuração

Microrganismos	Características do processo
Predominância de flagelados e rizópodes	Lodo jovem, característico de início de operação
Predominância de flagelados	Deficiência na aeração, má depuração e sobrecarga orgânica
Predominância de ciliados pedunculados e livres	Boas condições de depuração
Presença de <i>Arcella</i> (rizópode com teca)	Boa depuração
Presença de <i>Aspidisca costata</i> (ciliado livre)	Nitrificação
Presença de <i>Trachelophyllum</i> (ciliado livre)	Idade do lodo alta
Presença de <i>Vorticella microstoma</i> (ciliado pedunculado) e baixa concentração de ciliados livres	Efluente de má qualidade
Predominância de anelídeos do gênero <i>Aelosoma</i>	Excesso de oxigênio dissolvido
Predominância de filamentos	Intumescimento do lodo ou bulking filamentoso

Fonte: VAZOLLER et al (1989)

Além desses microrganismos que são muito importantes para o processo há também aqueles que são indesejáveis, pois interferem na operação adequada dos reatores biológicos quando presentes em números significativos e, por conseguinte, prejudicam a qualidade do efluente tratado.

O principal problema gerado por esses microrganismos é uma condição conhecida como intumescimento do lodo, no qual o floco biológico têm péssimas características de sedimentação. O intumescimento do lodo pode resultar em um efluente com altas concentrações de sólidos em suspensão e uma pobre performance de tratamento.

Outra condição indesejável é a formação de espuma relacionada ao desenvolvimento de dois gêneros de bactérias, *Nocardia* e *Microthrix* (METCALF e EDDY, 2003). Este tema será abordado em item específico posteriormente.

3.1.3. Fatores ambientais que influenciam o processo de lodo ativado

Os fatores ambientais mais importantes que influenciam o processo de tratamento de esgotos por lodo ativado são: pH, temperatura, toxicidade e metais.

Para remoção da matéria carbonácea, pode-se trabalhar na faixa de pH entre 6 a 9, mas recomenda-se manter o pH próximo do valor neutro (pH 7,0). A concentração de oxigênio dissolvido no reator geralmente utilizada é de 2,0 mg/L. As bactérias heterotróficas que atuam nesse processo de remoção da matéria carbonácea podem tolerar altas concentrações de substâncias tóxicas (METCALF e EDDY, 2003).

Por sua vez, a nitrificação é um processo mais facilmente afetado por fatores ambientais que incluem pH, toxicidade, metais e amônia não-ionizada ou livre. Para valores de pH abaixo de 6,8 as taxas decaem significativamente. Entre pH 5,8 a 6,0 as taxas podem ser de 10% a 20% dos valores em pH 7,0. A taxa ótima para nitrificação ocorre entre pH 7,5 a 8,0. Porém, normalmente um pH entre 7,0 a 7,2 é utilizado, por manter taxas razoáveis (METCALF e EDDY, 2003).

Em relação à toxicidade, os organismos nitrificantes são sensíveis a diversos compostos orgânicos e inorgânicos e a concentrações muito abaixo daquelas que afetam os organismos heterotróficos. Os compostos orgânicos incluem solventes

orgânicos, aminas, proteínas, taninos, compostos fenólicos, álcoois, cianetos, éteres, carbamatos e benzenos. Estes organismos têm se apresentados bons indicadores da presença de compostos orgânicos tóxicos a baixas concentrações (METCALF e EDDY, 2003).

Metais também são tóxicos a esses microrganismos. Skinner e Walker (1961) apud Metcalf e Eddy (2003) apresentaram resultados onde havia completa inibição da nitrificação em concentrações de 0,25 mg/L de níquel, 0,25 mg/L de cromo e 0,10 mg/L de cobre.

Para ambos os objetivos de remoção de matéria carbonácea e a nitrificação da amônia é recomendável manter um valor de pH em torno de 7,0 no sistema. Segundo Van Haandel e Marais (1999), o valor e a estabilidade do pH são determinados principalmente pela alcalinidade do afluente e pela alcalinidade produzida ou consumida no sistema. No reator biológico é necessário manter um valor de no mínimo 35 ppm CaCO_3 , caso contrário, será preciso adicionar um alcalinizante externo para evitar instabilidade operacional, pois o pH tenderá a assumir valores muito menores que 7,0. O alcalinizante poderá ser cal, soda cáustica, bicarbonato de sódio ou hidróxido de magnésio.

No caso da temperatura, este não influencia somente as atividades metabólicas da população microbiana, como também tem um profundo efeito em fatores como as taxas de transferências gasosas e nas características de sedimentação dos sólidos biológicos (METCALF e EDDY, 2003).

Além dos fatores ambientais também é preciso atenção aos nutrientes que podem ser muitas vezes o fator limitante ao crescimento das células.

Os principais nutrientes inorgânicos para os microrganismos são N, S, P, K, Mg, Ca, Fe, Na e Cl. Em estações de tratamento de esgotos municipais, geralmente, há quantidades de nutrientes suficientes, mas em águas residuárias industriais pode ser necessária a adição nos processos biológicos de tratamento (METCALF e EDDY, 2003).

3.1.4. Problemas de separação de sólidos

A maior parte dos problemas de separação de sólidos em processos de lodo ativado pode estar relacionada com a natureza do floco formado. Um típico sistema de lodo ativado pode apresentar uma faixa ampla de tamanho de partículas, desde uma simples bactéria de aproximadamente 0,5 a 5 μm até um grande aglomerado de flocos que pode atingir tamanho maior que 1 mm (1000 μm) (JENKINS et al., 2003).

Segundo Jenkins et al (2003) estes problemas podem ser classificados da seguinte forma:

- A) Crescimento disperso: neste caso os microrganismos encontram-se dispersos, formando apenas pequenos aglomerados ou células individuais. Este crescimento é causado pela ausência ou quebra do exopolímero, assim os microrganismos não conseguem se ligar uns aos outros. O efluente é turvo e não há zona de sedimentação.
- B) Intumescimento não filamentoso ou gelatinoso: é causado por uma quantidade excessiva de material exocelular que pode ou não estar relacionado ao crescimento zoogléico. As células microbianas floculentas e dispersas estão cercadas de grandes quantidades de biopolímeros exocelulares retentoras de água. Essa condição produz um lodo viscoso, que sedimenta e compacta mal e possivelmente constitui uma das condições do intumescimento não filamentoso. Resulta em taxas de sedimentação e compactação reduzidas e em casos severos não há separação de sólidos.
- C) Floco pontual: os flocos são pequenos (cerca de 75 μm), frágeis, esféricos e compactos devido a presença somente de bactérias formadoras de flocos. Os flocos maiores sedimentam rapidamente e os pequenos muito lentamente. Baixo índice volumétrico do lodo (IVL) e efluente turvo com alta concentração de sólidos em suspensão.
- D) Intumescimento filamentoso: é causado pelo excesso de organismos filamentosos. Estes interferem na sedimentação e na compactação do lodo ativado por produzir uma estrutura do floco difusa ou pelo seu crescimento

excessivo projetando-se para fora da estrutura do floco fazendo com que se una aos outros flocos igualmente filamentosos. Quando o lodo filamentososo sedimenta, produz um sobrenadante muito limpo, de baixa turbidez, porque os organismos filamentosos formam uma rede que filtra as partículas pequenas (bactérias dispersas) que poderiam causar turbidez.

- E) Espuma/escuma: este problema está associado geralmente à presença de filamentosas do tipo *Nocardia* e *M. parvicella*. Estes organismos possuem a superfície da célula hidrofóbica e ficam mais propensos a se ligar com as bolhas de ar. O agregado bolha de ar-floco é menos denso do que a água e flota para superfície onde acumula e forma uma espuma grossa de cor marrom chocolate. Outras formas de espumas causadas por microrganismos devem-se a deficiências de nutrientes e à desnitrificação. A desnitrificação no decantador secundário devido às condições anóxicas forma bolhas de nitrogênio gasoso (N_2) no qual os flocos se aderem e flutam para a superfície.

O principal problema causado pelos organismos indesejáveis é o intumescimento do lodo, na qual o floco biológico tem pobres características de sedimentação (METCALF e EDDY, 2004).

De maneira sucinta, as principais causas do intumescimento do lodo são: baixas concentrações de OD no reator, pH inferior a 6,5, baixa carga de floco na entrada do reator, deficiência de nutrientes, septicidade do esgoto e presença de grandes quantidades de carboidratos rapidamente biodegradáveis (VON SPERLING, 2002).

As condições de operação do reator (baixo OD, baixa relação A/M, e operação em mistura completa) têm claramente efeito no desenvolvimento de organismos filamentosos. Estes são muito competitivos a concentrações baixas de substrato seja em relação a substratos orgânicos, OD ou nutrientes. Então, sistemas de lodo ativado em mistura completa com pouca carga ou OD baixo (<0,5 mg/L) fornecem um ambiente mais favorável às bactérias filamentosas do que às formadoras de flocos. (METCALF e EDDY, 2004).

Em situações de emergências podem-se utilizar medidas alternativas como a aplicação de cloro e de peróxido de hidrogênio para eliminar as bactérias filamentosas. Mas, para um controle efetivo é preciso atuar sobre as causas

eliminando as condições que favoreceram a proliferação desses organismos. Um exemplo disso é o uso de câmaras seletoras ou seletores.

Seletor é uma zona de mistura do esgoto afluente e do lodo ativado recirculado, antes do corpo principal do reator, com condições particulares de aeração e de agitação. Esta nova concepção tem a característica de selecionar uma população microbiana não filamentosa (JORDÃO e PESSOA, 2005).

Segundo Jenkins e Daigger (1990) apud Jordão e Pessoa (2005) os organismos seletores consomem o substrato orgânico (DQO solúvel, por exemplo) muito mais rapidamente que os organismos típicos de um sistema de mistura completa convencional e são capazes de armazenar a maior parte da DQO solúvel nas suas células para utilização em fase posterior. O que não ocorre igualmente com os organismos filamentosos minimizando sua presença.

3.1.5. Variantes do processo

Existem diversas variantes do processo de lodo ativado, mas os sistemas mais utilizados são os de lodo ativado convencional e os de aeração prolongada e dentro desse conceito podem ser divididas da seguinte maneira (VON SPERLING, 2002):

- Divisão quanto à idade do lodo
 - Lodo ativado convencional
 - Aeração prolongada
- Divisão quanto ao fluxo
 - Fluxo contínuo
 - Fluxo intermitente (em batelada)
- Divisão quanto ao efluente à etapa biológica do sistema de lodo ativado
 - Esgoto bruto
 - Efluente de decantador primário
 - Efluente de reator anaeróbio
 - Efluente de outro processo de tratamento de esgotos

Em projetos de dimensionamento de reatores biológicos de fluxo contínuo com o objetivo de remoção da matéria carbonácea, a principal etapa é a seleção da idade do lodo (VON SPERLING, 2002).

A Tabela 3 apresenta as variantes do processo de lodo ativado em função da idade do lodo.

Tabela 3 - Variantes do processo de lodo ativado em função da idade do lodo

Faixa de idade do lodo	A/M (kg DBO/ kg SSVTA)	Carga volumétrica (kg DBO/ m ³ TA)	Denominação usual
2 a 4 dias	0,4 a 1,5	1,1 a 3,0	Alta capacidade
4 a 15 dias	0,2 a 0,4	0,3 a 0,6	Convencional
20 a 30 dias	0,05 a 0,15	0,05 a 0,4	Aeração prolongada

Fonte: Adaptado de JORDÃO e PESSOA (2005)

Alguns parâmetros de projeto do reator objetivando a remoção de matéria carbonácea (DBO), segundo VON SPERLING (2002), estão listados nas Tabela 4.

Tabela 4 - Alguns parâmetros de projeto do reator biológico para remoção de carbono

Parâmetro	Lodo Ativado convencional	Aeração Prolongada
Idade do lodo (d)	4 a 10	18 a 30
Concentração SSTA (mg/L)	1.500 a 3.500	2.500 a 4.000
Concentração SS no efluente (mg/L)	10 a 30	10 a 30
Razão de recirculação (Qr/Q)	0,6 a 1,0	0,8 a 1,2
Concentração média de OD no reator (mg/L)	1,5 a 2,0	1,5 a 2,0
Relação A/M (kg DBO/ kg SSVTA.dia)	0,3 a 0,8	0,08 a 0,15
Tempo de detenção hidráulica (h)	6 a 8	16 a 24

Fonte: Adaptado de VON SPERLING (2002)

Para o cálculo da remoção de DBO_{5,20} são necessários coeficientes cinéticos e estequiométricos, alguns deles estão resumidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Alguns coeficientes cinéticos e relações básicas para o cálculo da remoção de DBO em sistema de lodo ativado

Coeficiente	Descrição	Unidade	Faixa	Valor típico
Y	Coeficiente de produção celular	gSSV/gDBO _{5,20}	0,4 a 0,8	0,5
k _d	Coeficiente de respiração endógena	d ⁻¹	0,06 a 0,10	0,08 a 0,09
fb'	Fração biodegradável ao gerar os sólidos (SS _b /SSV)	gSSb/SSV	-	0,8
SS _b /SSV	SS biodegr. / SSV no esgoto bruto	gSS _b /SS	-	0,60

Fonte: Adaptado de VON SPERLING (2002)

Nesta pesquisa será estudado o processo de lodo ativado com aeração prolongada, fluxo contínuo, tratando esgoto bruto. Portanto, será dada ênfase a essa variante do processo.

3.1.5.1. Aeração Prolongada

Esta modalidade trabalha com elevada idade do lodo, ou seja, a biomassa permanece no sistema entre 18 a 30 dias e o tempo de detenção hidráulica é em torno de 16 a 24 horas. Em função dessas características haverá menor disponibilidade de alimento para as bactérias e, para sobreviver, passam a utilizar de maneira mais intensa nos seus processos metabólicos a própria matéria orgânica biodegradável componente de suas células. Essa matéria orgânica celular é convertida em gás carbônico e água através da respiração. Isso corresponde a uma estabilização da biomassa ocorrendo no próprio tanque de aeração (VON SPERLING, 2002).

A quantidade relativamente baixa de substrato disponibilizado para os microrganismos é expressa pela relação alimento/microrganismo (A/M), kg DBO/ kg SSTA.dia. Segundo Von Sperling (2002), na aeração prolongada costuma variar de 0,07 a 0,15 kgDBO/kgSSVTA.dia.

Esta variação de lodo ativado obriga então, os microrganismos a ficarem em contato por tempo suficientemente longo com quantidades relativamente baixas de substrato de maneira a obter uma alta eficiência do processo e oxidação na fase

endógena, até que o lodo residual apresente características de boa sedimentação, boa filtrabilidade e nenhum odor (lodo mineralizado) e DBO residual do substrato bastante baixa (JORDÃO e PESSOA, 2005).

A Figura 3 apresenta o esquema de ETE pelo processo de lodo ativado com aeração prolongada.

Figura 3 - Esquema de ETE por lodo ativado com aeração prolongada

A unidade de decantação primária é suprimida devido à elevada quantidade de lodo mantida no tanque de aeração e maior volume relativo do tanque que podem amenizar picos de carga orgânica, as cargas com certa toxicidade, e da mesma forma, matérias volumosas de lenta degradação têm, graças ao maior tempo de contato, melhores possibilidades de absorção e oxigenação (JORDÃO e PESSOA, 2005).

Pode-se dizer, então, que as principais características dos sistemas de aeração prolongada são: elevadas eficiências de remoção da matéria orgânica e nitrificação, associado a um elevado consumo energético para suprir a demanda de oxigênio dos processos e menor produção de lodo a ser tratado.

A produção de lodo no processo de tratamento biológico aeróbio dos esgotos sanitários por lodo ativado por aeração prolongada, segundo estudo de Alem Sobrinho (2001), com idade do lodo entre 18 a 30 dias ou relação alimento/microrganismo (A/M) igual a 0,07 a 0,15 kg DBO/dia.kg SSVTA sem decantador primário: 38 a 43 g SST/hab.dia ou 28 a 32 g SSV/hab.dia (base seca) ou 5 a 12 L / hab.dia.

Com os principais aspectos do processo de tratamento de esgotos por lodo ativado apresentado, será iniciada a revisão sobre os resíduos gerados nas Estações de Tratamento de Água.

3.2. Os resíduos gerados nas estações de tratamento de água (ETAs)

Segundo a ASCE e AWWA (1996), citado por Ferreira Filho e Alem Sobrinho (1998), os resíduos gerados nas estações de tratamento de água (ETAs) podem ser divididos em quatro categorias:

- (A) Resíduos gerados durante processos de tratamento de água visando a remoção de cor e turbidez. Em geral, os resíduos sólidos produzidos englobam os lodos gerados nos decantadores (ou eventualmente de flotadores com ar dissolvido) e as água de lavagem dos filtros.
- (B) Resíduos sólidos gerados durante processos de abrandamento.
- (C) Resíduos gerados em processos de tratamento avançado visando a redução de compostos orgânicos presentes na água bruta, tais como carvão ativado granular saturado, ar proveniente de processos de arraste com ar, etc...
- (D) Resíduos líquidos gerados durante processos visando a redução de compostos inorgânicos presentes na água bruta, tais como processos de membrana (osmose reversa, ultrafiltração, nanofiltração, etc).

Como no Brasil o sistema de tratamento tradicional ou de ciclo completo (lodos gerados na remoção de turbidez e cor) é o mais empregado, serão enfocados os resíduos gerados neste processo.

A Figura 4 apresenta um esquema do processo de tratamento convencional e os principais pontos de geração de resíduos.

O processo convencional é constituído de mistura rápida (coagulação), mistura lenta (floculação), sedimentação e filtração. Os principais resíduos gerados neste processo são: resíduos líquidos decorrentes da lavagem dos filtros e da limpeza dos decantadores. Além desses sub-produtos são gerados também resíduos sólidos nos tanques de floculação e nos tanques de preparo de soluções de produtos químicos, mas esse volume não é significativo (GRANDIN, 1992).

Figura 4 - Pontos de geração de resíduos em uma ETA convencional
Fonte: CORDEIRO, 1999

Cada ponto de geração de resíduos apresenta características distintas em termos de vazão e concentração de sólidos em virtude das diferentes concepções de tratamento (FERREIRA FILHO e ALEM SOBRINHO, 1998). Essas diferenças serão apresentadas no próximo item.

3.2.1. Resíduos da água de lavagem dos filtros

Estes resíduos apresentam concentrações não muito elevadas de sólidos em suspensão totais (SS), geralmente entre 200 e 500 mg/L que variam com o tempo de lavagem dos filtros e representam uma parcela considerável do volume de efluentes líquidos produzidos na ETA (REALI, 1999). Esse volume representa entre 2 a 5% do total da água tratada em uma estação de tratamento de água (ASCE e AWWA, 1996).

A água de lavagem de filtro tem sido, historicamente, retornado ao início da ETA para ser processada novamente. Um tanque de equalização é normalmente empregado de modo que a água consumida na lavagem possa retornar ao início da ETA numa taxa menor que 10% da vazão de água bruta. Preocupações sobre a recirculação de microrganismos, agravamento de problemas de gosto e odor, aumento de sub-produtos da desinfecção e outras questões têm reduzido drasticamente o número de ETAs que recirculam diretamente a água da lavagem de filtros (ASCE e AWWA, 1996).

No Brasil, as ETAs do Guaraú e Alto da Boa Vista (São Paulo), ambas responsáveis pelo abastecimento de água de parte da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), com capacidade para 33,0 e 11,0 m³/s, respectivamente, reaproveitam com sucesso 100% de suas águas de lavagem representando cerca de 880 L/s que é capaz de abastecer 300.000 habitantes aproximadamente (FERREIRA FILHO e ALEM SOBRINHO, 1998).

3.2.2. Lodos gerados nos decantadores de ETAs

Os lodos gerados nas estações de tratamento de água são águas que contêm sólidos em suspensão provenientes da água bruta e da adição de produtos químicos (cloreto férrico ou sulfato de alumínio) no processo de tratamento. Se a água bruta possuir elevada concentração de sólidos em suspensão, o lodo terá alta parcela de hidróxidos precipitados de natureza gelatinosa (hidróxido de ferro ou hidróxido de alumínio) e apresentarão as características indicadas na Tabela 4.

Tabela 6 - Características do lodo a base de alumínio/ferro

Teor de sólidos (%)	Características do lodo
0-5%	Líquido
8-12%	Esponjoso, semi-sólido
18-25%	Levemente argiloso
40-50%	Argila dura

Fonte: ASCE e AWWA, 1996

A vazão de lodo gerado nos decantadores varia de acordo com o sistema de remoção de lodo. Segundo Grandin (1992) a limpeza manual resulta em resíduos mais concentrados que os obtidos pela remoção mecanizada, representando uma parcela muito pequena, cerca de 0,06 a 0,25% do volume de água tratada.

Já em decantadores com raspadores mecanizados de lodo, como os da ETA do sistema Rio das Velhas (CASTRO et al, 1997), a vazão média chega à cerca de 10% da vazão de água tratada.

3.2.3. Características gerais dos resíduos gerados nas ETAs

A qualidade da água bruta a ser tratada e o tipo e a dosagem dos produtos químicos utilizados no processo de coagulação dessa água influem significativamente na qualidade e nas características dos lodos gerados em ETAs convencionais. Como no Brasil o manancial geralmente utilizado é o rio, este pode apresentar variações sazonais significativas em termos de qualidade da água bruta, como por exemplo, mudanças de turbidez, ao longo do ano (REALI, 1999).

Além disso, um aspecto de fundamental importância é a respeito da qualidade dos produtos químicos utilizados. Cordeiro (1993) analisou cinco amostras de sulfato de alumínio comercial e os resultados apresentaram a presença de contaminantes metálicos em grande variação tanto quanto à quantidade e como ao tipo de impureza encontrado num mesmo produto químico proveniente de diferentes fabricantes.

Outro fator, agora de natureza operacional, que influi nas características do lodo gerado nas ETAs é a maneira como os sólidos gerados são removidos do decantador. Os decantadores de limpeza manual têm o lodo acumulado por longos períodos, chegando há meses na maioria dos casos. A limpeza manual resulta em produção de lodo em batelada. Já os decantadores providos de removedores mecanizados de lodo realizam a operação diariamente (ou em períodos menores). Comparando-se o lodo gerado, no primeiro caso, o teor de sólidos do lodo é maior e o volume total produzido é menor. Em contraposição, no segundo caso, com limpeza mecanizada, o teor de sólidos é menor e, portanto, maior volume total produzido (REALI, 1999).

A Tabela 5 apresenta algumas características do lodo gerados em ETAs ressaltando-se a necessidade de estudar o problema de modo individualizado.

Tabela 7 - Algumas características dos lodos gerados em ETAs

Autor/ano	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	ST (mg/L)	SV (%)	SS % ST
Neubauer (1968)	30 a 150	500 a 15.000	6,0 a 7,6	1.100 a 16.000	20 a 30%	-
Sutherland (1969)	100 a 232	669 a 1.100	7,0	4.300 a 14.000	25%	80%
Bugg (1970)	380	1.162 a 15.800	6,5 a 6,7	4.380 a 28.580	20%	-
Albrecht (1972)	30 a 100	500 a 100.000	5,0 a 7,0	3.000 a 15.000	20%	75%
Culp (1974)	40 a 150	340 a 5.000	7,0	-	-	-
Nilsen (1974)	100	2.300	-	10.000	30%	-
Singer (1974)	30 a 300	30 a 5.000	-	-	-	-
Cordeiro (1981)	320	5.150	6,5	81.575	20,7%	-
Vidal (1990)	449	3.487	6,0 a 7,4	21.974	15%	-
Vidal (1990)	173	1.776	6,7 a 7,1	6.300	73%	-
Cordeiro (1993)	-	5.600	6,4	30.575	26,3%	-
Patrizze (1998)	-	-	5,55	6.112	19%	-
Patrizze (1998)	-	-	6,8	6.281	-	-

Fonte: CORDEIRO, 1993

A matéria orgânica contida no lodo de ETA é prontamente oxidável, porém de baixa biodegradabilidade (ALBRECHT, 1972).

Além dos parâmetros apresentados acima, outros parâmetros físico-químicos e biológicos são utilizados para caracterizar o lodo de ETA: concentração dos principais íons metálicos de interesse (alumínio, ferro, manganês, cádmio, mercúrio, chumbo, cromo, cobre, etc), concentração de fósforo total, nitrogênio total Kjeldahl (NTK), além de índices bacteriológicos e biológicos de interesse sanitário (coliformes totais e fecais, contagem de ovos de helmintos, etc) (REALI, 1999).

Quanto ao aspecto do lodo, em geral, ETAs que utilizam sulfato de alumínio como coagulante produzem lodo de coloração marrom, com viscosidade e consistências que lembram chocolate líquido (REALI, 1999).

3.2.4. Produção de lodo em ETAs

Há diversas formas de se realizar a quantificação do lodo gerado no tratamento de água convencional.

Segundo Ferreira Filho e Alem Sobrinho (1998) duas diferentes situações são comumente encontradas. Para o caso de ETAs existentes, a determinação da produção de lodo, pode ser estimada *in loco* pelo monitoramento dos seus diversos processos e operações unitárias durante um intervalo de tempo (pelo menos 1 ano) em que sejam contempladas as variações da água bruta e das características do tratamento (tipo e dosagem de coagulante, pH de coagulação, etc). Já a produção de lodos para ETAs em fase de projeto é mais complexa e pode ser determinada por meio de dados de ETAs que possuam características similares ou por meio de formulações empíricas.

Muitas equações foram desenvolvidas baseando-se nas características da água bruta e na quantidade de coagulante utilizado, porém as mais utilizadas são as de Cornwell et al (1987):

$$S = (8,34 Q) (0,44.AI + SS + A)$$

onde:

S = lodo produzido (libras/dia)

Q = vazão da estação, milhões galão por dia (MGD)

AI = dosagem de alumínio, (mg/L, como 17,1% Al_2O_3),

SS = concentração de sólidos em suspensão totais na água bruta (mg/L)

A = outros aditivos em mg/L (polímeros, carvão ativado em pó, etc)

$$S = (8,34 Q) (2,9 .Fe + SS + A)$$

onde:

Fe= dosagem de ferro, (mg/L, como Fe),

Essas equações foram adaptadas por Ferreira Filho e Alem Sobrinho (1998), assumindo que o residual de alumínio e ferro sejam desprezíveis na água tratada:

$$P_L = k_1 \cdot q \cdot (4,89 \cdot D_{Al} + SS + CAP + OA) \cdot 10^{-3}$$

$$P_L = k_1 \cdot q \cdot (2,88 \cdot D_{Fe} + SS + CAP + OA) \cdot 10^{-3}$$

onde:

P_L = produção de lodo seco em g/hab/dia

q = coeficiente de consumo “per-capita” em L/hab/dia

k_1 = coeficiente da hora de maior consumo

D_{Al} = dosagem de sais de alumínio, expresso como Al em mg/L,

D_{Fe} = dosagem de sais de ferro, expresso como Fe em mg/L

SS = concentração de sólidos em suspensão totais na água bruta em mg/L

CAP = concentração de carvão ativado em pó em mg/L

OA = outros aditivos em mg/L (sílica ativada, polímeros, etc...)

Ainda com relação às equações apresentadas, os coeficientes 4,89 e 2,88 presentes foram obtidos partindo-se do pressuposto de que todo o alumínio ou ferro adicionado na água bruta precipita-se como hidróxido metálico e que a cada molécula de $Fe(OH)_3$ ou $Al(OH)_3$ é incorporado cerca de três a quatro moléculas de água.

Um exemplo de produção de lodo de ETA utilizando cloreto férrico como coagulante está apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Produção de lodo de ETA de águas com diferentes valores de turbidez

Turbidez (UNT)	SST (mg/L)*	Coagulante (mg Fe^{+3})	P_L (g/hab/dia)
5	5	7,0 (20 mg $FeCl_3/L$)	6,0
30	30	10,5 (30 mg $FeCl_3/L$)	14,5

Fonte: FERREIRA FILHO, 2004

*foi considerado uma aproximação de Turbidez $\cong$ SST

Em 2005, segundo estatísticas da pesquisa de Januário (2005), seriam produzidos somente pelas setes principais ETAs da RMSP (ETA Guaraú, ETA Alto da Boa Vista, ETA Taiaçupeba, ETA Rio Grande, ETA Casa Grande, ETA Morro Grande e ETA Baixo Cotia) 110 toneladas/dia (base seca) de lodo, número que impressiona e preocupa uma vez que a RMSP sofre com a degradação da qualidade dos mananciais, comprometendo a qualidade da água bruta e gerando um consumo

cada vez maior de produtos químicos nos processos de tratamento de água e, conseqüentemente, a crescente produção de lodos de ETAs.

3.3. Tratamento do lodo gerado em ETAs

3.3.1. Aspecto histórico

Fazendo-se um breve comentário a partir da análise histórica no Brasil realizada por Cordeiro (2001) pode-se verificar que felizmente é crescente o número de pesquisas realizadas sobre o tema, porém a implantação de ações realmente concretas foi muito discreta. Segundo o autor citado, os primeiros trabalhos publicados sobre o tema foram apresentados na década de 70 (ALMEIDA, 1975 e CORDEIRO, 1977 apud CORDEIRO, 2001). Na década de 80, Cordeiro (1981) apud CORDEIRO (2001) apresentou dissertação de mestrado “Disposição, Tratabilidade e Reuso de Lodos de ETAs” e a Sabesp contratou uma empresa para o desenvolvimento de estudos sobre os lodos de ETAs gerados na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). E na década de 90 houve um aumento considerável de pesquisas realizadas, como a de Grandin (1992) aplicando a remoção de água de lodos de ETAs com o uso de filtros-prensa. A partir de então, outros estudos foram realizados como aplicação do lodo como condicionante do solo (CORDEIRO, 1994 apud CORDEIRO, 2001), recuperação de sulfato de alumínio de lodos de ETAs (PIOTTO, 1995 apud CORDEIRO, 2001), remoção de água de lodos utilizando filtros-prensa e leitos de secagem (CORDEIRO e CAMPOS, 1996 apud CORDEIRO, 2001), estudos sobre as condições de condicionamento do lodo dos decantadores (YUZHU e MORITA, 1998).

Agora nos anos 2000, muitas outras pesquisas para a disposição final e uso benéfico do lodo foram desenvolvidas, como será apresentado nos próximos itens.

A defasagem entre a pesquisa e a aplicação em escala real pode ser vista em trabalho recente realizada por Januário (2005). A autora pesquisou o planejamento da disposição final de lodos das principais ETAs da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), que no total são sete estações, e verificou que apenas a ETA Taiaçupeba possui uma linha de tratamento do lodo constituído de adensamento e

desidratação do lodo e possui solução, em projeto, para destino final do lodo desidratado em aterro sanitário exclusivo. A ETA Rio Grande também possui solução para o destino do lodo em fase de implantação das obras que será o seu encaminhamento para tratamento conjunto com os esgotos sanitários da ETE ABC. As demais ETAs não possuem sistemas de tratamento e disposição final dos lodos implantados ou propostos.

3.3.2. Tecnologias de tratamento do lodo de ETA

O lodo produzido nas estações de tratamento de água geralmente contém uma quantidade elevada de água (97 a 99,9%) e são poucos os casos em que este lodo pode ser disposto sem antes passar em algum tipo de tratamento. Uma exceção é à disposição do lodo via rede coletora de esgotos para as estações de tratamento de esgoto. Em todos os outros casos o lodo precisa ser tratado. Este tratamento basicamente envolve o aumento na concentração de sólidos no lodo por adensamento e desidratação (AWWARF, 1990).

Os tipos de tecnologias utilizadas para redução da água dos lodos de ETAs são as mesmas utilizadas para o lodo produzido pelos sistemas de tratamento de esgoto. O adensamento, operação unitária de fundamental importância para a desidratação do lodo, pode ser realizado por gravidade, flotação com ar dissolvido ou por equipamentos mecânicos, especialmente por adensadores do tipo correia. A desidratação pode ser realizada por meios naturais (leitos de secagem, lagoas de lodo) em ETAs de pequeno porte e com condições climática favoráveis, e por processos mecanizados, podendo ser utilizados centrífugas tipo decanter, filtros prensa de esteira, filtros prensa de placas e filtros a vácuo, sendo os dois primeiros os mais utilizados (FERREIRA FILHO e ALEM SOBRINHO, 1998).

Dentre as várias alternativas encontradas na literatura para disposição final do lodo de ETA's podemos citar: disposição em cursos d'água; disposição em aterros sanitários; disposição em aterros exclusivos; gerenciamento conjunto com lodo de tratamento de esgoto e co-disposição com bio-sólido; aplicação controlada em certos tipos de solo; aplicações industriais diversas (na indústria cerâmica,

incorporação em materiais da construção civil); regeneração do coagulante, entre outras (REALI, 1999; ASCE e AWWA, 1996).

Nos Estados Unidos, segundo a AWWARF (1999) apud Tsutiya (2001), as principais alternativas adotadas para disposição final dos lodos gerados em estações de tratamento de água são: disposição em aterros, na agricultura e na rede de esgotos (Figura 6).

Figura 5 - Disposição final de lodos de ETAs nos Estados Unidos
 Fonte: adaptado de AWWARF (1999) apud TSUTIYA (2001)

Segundo Tsutiya (2001), os usos benéficos de maior potencial de utilização para o Estado de São Paulo são: disposição no solo, fabricação de cimento, fabricação de tijolos, melhoria da sedimentabilidade em águas de baixa turbidez, recuperação de coagulantes, controle de H_2S , lançamento em redes coletoras de esgotos, etc.

Apenas será realizado um breve comentário acerca de algumas tecnologias utilizadas para a disposição desses lodos, excetuando-se a disposição em ETEs que será mais detalhada no próximo item.

- Disposição em aterros: Os aterros sanitários ainda se apresentam como uma alternativa viável devido à disponibilidade de áreas economicamente acessíveis nas cidades de pequeno e médio porte, porém é preciso cautela na quantidade e

qualidade de lodo disposto em conjunto com resíduos sólidos de origem predominantemente doméstica devido à possibilidade de lixiviação de metais pela diminuição do pH, por conta da fase acidogênica do processo de estabilização da matéria (BIDONE et al, 2001). É recomendável que o teor de sólidos do lodo (com sulfato de alumínio) seja maior que 25% (REALI, 1999).

- Aplicações industriais diversas: pela composição do lodo de ETA se assemelhar a materiais argilosos, muitas pesquisas foram realizadas para a sua incorporação em produtos utilizados na construção civil, como na fabricação de cerâmica vermelha (tijolos, telhas e manilhas) e em matrizes de argamassa e concreto. Essa aplicação pode reduzir a utilização de recursos naturais (areia e argila) e minimizar os impactos dos rejeitos produzidos pelas ETAs (REALI, 1999; SALES e CORDEIRO, 2001; HOPPEN et al, 2003; DAVID et al, 2002). O maior entrave nesta prática, depois de superado o desafio técnico, é viabilidade econômica e a aceitação e pelos consumidores por este produto.

- Disposição no solo: alternativa possível de ser adotada em casos em que se comprove a não existência de impactos negativos ao solo receptor (REALI, 1999). No caso da disposição em áreas degradadas, segundo Teixeira et al (2005), poderá haver promoção de sua recuperação pelo aumento de teores de macronutrientes e do pH do solo, principalmente, se associado a um resíduo orgânico. Se o lodo for gerado por coagulante a base de alumínio, sua disposição deve ser cuidadosa, pois o alumínio possui grande afinidade de ligação com o fósforo disponível para as plantas (REALI, 1999; IPPOLITO et al., 2003 e HSU e RENNIE, 1962 apud GALARNEAU e GEHR, 1997; LIJKLEMA, 1980 apud GALARNEAU e GEHR, 1997; SIMS e ELLIS, 1983 apud GALARNEAU e GEHR, 1997).

3.3.3. Disposição do lodo de ETA em ETE

Uma alternativa de destino do lodo de ETA interessante tanto do ponto de vista técnico como econômico é o lançamento do lodo em rede coletora de esgoto para posterior tratamento na ETE. Mas, para isso, o sistema de coleta, transporte e

tratamento do esgoto deve ter capacidade operacional para absorver a vazão/carga adicional decorrente do lançamento e não deve haver acúmulo na rede de sólidos presentes no lodo. Esta alternativa mostra-se atraente, principalmente, para cidades pequenas, pois concentraria os problemas referentes ao lodo em um único sistema, absorvendo custos operacionais e de investimento necessários para a linha de tratamento do lodo de ETA. O custo de uma linha de tratamento de lodo pode variar de 20 a 60% dos custos operacionais de uma estação de tratamento (ANDREOLI, 2001). Além da capacidade operacional no sistema de coleta, transporte e tratamento de esgoto, é necessário também levar em consideração o tratamento da fase sólida desses sistemas, uma vez que esta prática é basicamente um método de transferência de sólidos. Então, é preciso uma capacidade adicional nas instalações de tratamento da fase sólida (adensamento, digestão, desidratação e destino final).

Segundo Cornwell et al (1987) a disposição dos resíduos de ETAs em ETEs pode ser amplamente praticado e ter sucesso se for realizado um constante monitoramento do sistema e uma equalização do lodo proveniente dos decantadores e dos filtros antes do descarte na ETE. Os possíveis efeitos no tratamento biológico de esgotos, tanto benéficos como prejudiciais, estão relacionadas à toxicidade, remoção de sólidos suspensos ou aumento destes, remoção de DBO/DQO ou aumento destes e remoção de fósforo no efluente final.

Para o transporte do lodo de ETA para a ETE, geralmente são utilizados três tipos de sistema de transporte: via rede coletora (gravidade), sistemas de recalques e transporte via caminhão. A descarga via rede coletora, quando possível, é a opção de menor custo e a mais escolhida. Porém, é aquela que oferece menor flexibilidade no tratamento (os resíduos produzidos na ETA vão ser processados em todas as etapas do tratamento de esgotos). As outras duas alternativas, sistemas de bombeamento ou via caminhão, tem custo maior, porém o descarte é controlável e pode ser direcionada ao ponto em que se deseja, na fase líquida ou sólida, da ETE (ASCE e AWWA, 1996).

Muitas vezes é necessário o pré-tratamento do lodo de ETA antes do lançamento no processo de tratamento de esgotos. O pré-tratamento mais utilizado é a equalização da vazão de descarte. Outros requisitos para o lançamento podem incluir regularização da qualidade do descarte: neutralização do pH, homogeneização da descarga em termos da concentração, limitação de sólidos

totais, limitação de metais que podem causar corrosão e odores ou outras condições indesejáveis (ASCE e AWWA, 1996).

A seguir serão levantados os principais efeitos que podem ocorrer no processo de tratamento de esgotos por lodo ativado.

3.3.1.1.Efeitos sobre a remoção de matéria orgânica (DBO/DQO) e a nitrificação

O lodo gerado nas estações de tratamento de água além de trazer substâncias orgânicas e inorgânicas presentes na água bruta contém hidróxidos metálicos provenientes do coagulante (alumínio ou ferro) e, possivelmente, outros metais pesados contaminantes, dependendo da qualidade dos produtos químicos.

Segundo a ASCE e AWWA (1996), os metais pesados são os mais freqüentes responsáveis pelos problemas com toxicidade nas ETEs e podem ser agrupados em metais essenciais e não-essenciais, de acordo com sua importância aos sistemas biológicos. A maioria dos metais encontra-se na categoria dos essenciais. Os metais não-essenciais mais comuns são cádmio, mercúrio e chumbo. Apesar dessa classificação, é importante lembrar que quase todos os metais podem exercer efeitos tóxicos a concentrações elevadas, além disso, duas questões importantes devem ser consideradas:

- 1) No caso dos metais essenciais aos processos biológicos, um aumento em sua concentração pode muitas vezes melhorar as condições biológicas se existir inicialmente uma deficiência em metais;
- 2) Quando metais essenciais estão presentes em excesso, estes podem algumas vezes exercer uma toxicidade maior que os metais não-essenciais.

Além dessa classificação, outro aspecto importante aos processos biológicos é o fato de os metais sofrerem reações químicas conhecidas por complexação e, segundo a ASCE e AWWA (1996), é a maior responsável pelo potencial de toxicidade. A porção dissolvida disponível como íon metálico livre é, geralmente, a mais tóxica para os sistemas biológicos. Porém, esta simples diferenciação entre as formas particuladas e dissolvidas geralmente não é a forma mais adequada para determinar os efeitos tóxicos.

Apesar de todo esse potencial tóxico, os microrganismos presentes no tratamento biológico de esgotos podem se ajustar à presença de compostos inorgânicos (CORNWELL et al., 1987).

Rolan, segundo Cornwell et al (1987), analisou o efeito da aplicação de lodo contendo alumínio nos processos biológicos. Salotto et al (1974) também estudou o efeito da aplicação de lodo em um sistema piloto de lodo ativado. Estes estudos mostraram que, de modo geral, se o lodo da ETA for equalizado não ocorrerão oscilações no tratamento biológico. Se houver decantador primário a maior parte dos sólidos provenientes da ETA serão removidos nesse ponto. Não é esperada nenhuma mudança na remoção de DBO/DQO ou de sólidos suspensos, mas deverão ser parâmetros de monitoramento. Se não houver decantadores primários alguns impactos adversos para o sistema poderão ser observados: o processo de lodo ativado necessitará ser operado com uma concentração mais alta de sólidos suspensos para manter a concentração desejada de sólidos em suspensão voláteis e poderá ocorrer sobrecarga nos decantadores secundários, resultando em arraste de sólidos no efluente.

Um estudo apresentado recentemente foi desenvolvido por Oliveira (2005) apresenta o caso de lançamento de lodo de ETA em um sistema de lagoas de estabilização (anaeróbia seguida de facultativa) na ETE do município de São Lourenço da Serra. Foram avaliadas variáveis físico-químicas e microbiológicas das amostras de esgoto bruto e de efluente de lagoas anaeróbia e facultativa antes e depois do lançamento dos resíduos gerados na ETA. Durante as duas fases da pesquisa verificou-se um desempenho na remoção da matéria orgânica em termos de $DBO_{5,20}$ de 90,5% na primeira fase e 88,8% na segunda. E, portanto, concluiu-se que não houve interferências no processo biológico de tratamento de esgoto, principalmente, em referência aos parâmetros de lançamento do efluente final. Com relação ao volume de lodo gerado em lagoas de estabilização durante esta pesquisa não houve alteração considerável no volume de material sólido confirmado pelos ensaios batimétricos onde a taxa de acumulação média anual de lodo na primeira fase foi de aproximadamente 10,0 e 11,4 cm/ ano para a primeira e segunda fase, respectivamente.

Scalizer (2003) estudou a influência da disposição de lodo de ETA (sulfato de alumínio) em duas etapas. Na primeira fase, a influência sobre a sedimentação (será comentada no próximo item) e na segunda fase a influência em uma estação piloto

composta de lagoa de aeração seguida de lagoa de sedimentação. Foi adicionado ao sistema lodo da ETA a base de cloreto férrico e verificou-se que tal resíduo melhorou a qualidade do efluente em termos de DQO, $\text{DBO}_{5,20}$, SST, turbidez, cor, amônia, nitrato, NTK e fosfato total. Assim, portanto, neste caso também não houve interferências no processo de tratamento biológico.

3.3.1.2. Efeitos sobre a decantação

De maneira geral, é esperado o aumento no volume de lodo do decantador primário (se houver) com a adição de lodo de ETA ao esgoto. Quanto à eficiência do decantador primário, alguns estudos apontam uma possível melhora na remoção de sólidos. Segundo Carvalho e Di Bernardo (1999) isso pode ser possível devido à presença de hidróxido de ferro no resíduo do lodo de ETA, que floclula o esgoto, principalmente devido ao fenômeno de entrelaçamento (“entrapment”) das partículas presentes no esgoto.

Carvalho e Di Bernardo (1999), um dos primeiros trabalhos realizados no Brasil em escala de laboratório a respeito desse tema, estudaram a interferência do lodo de ETA com cloreto férrico em uma ETE no desempenho dos decantadores primários e na digestão anaeróbia do lodo. O estudo do desempenho dos decantadores primários se deu através de testes de sedimentação e verificou que houve aumento da remoção de sólidos em suspensão em consequência do aumento da quantidade e da concentração do resíduo de ETA introduzido. Em relação aos digestores de lodo, utilizou teste de tratabilidade anaeróbia e verificou-se que o lodo não causou efeito prejudicial ao desempenho da ETE.

Na primeira fase do trabalho desenvolvido por Scalize (2003) em colunas de sedimentação com e sem lançamento de lodo de ETA, verificou-se que o sobrenadante da coluna com lançamento de lodo de ETA apresentava uma maior redução na concentração dos parâmetros cor, turbidez, SST, SSV e DQO, além de coliformes totais, *Escherichia coli*, ovos de *Ancylostomidae* e larvas de *Strongylaides*.

Dentre as experiências nacionais em escala real, pode ser citado o caso da ETE do município de Franca operado pela Sabesp. Segundo MELO et al (2002),

esta ETE é um caso específico, opera com três decantadores primários, sendo que dois trabalham continuamente e um como pulmão (recebe esgoto durante todo o dia e a noite é feito seu descarte). Numa primeira experiência, no momento do lançamento do lodo da ETA (descarte em batelada), a vazão na ETE chegava a 400 L/s a mais que a vazão normal de pico, o que gerou um efluente do decantador primário com sólidos sedimentáveis médios de 0,0 mL/L para 70 mL/L. Então para corrigir esses valores realizaram uma manobra operacional. Todo o lodo de ETA era recebido, primeiramente, pelo decantador pulmão (funcionando como um equalizador de vazão) e após o seu enchimento, era direcionado para o restante dos decantadores primários. Com essa manobra os sólidos sedimentáveis passaram para o valor de 3,0 mL/L.

Outra pesquisa que aponta uma possível redução na eficiência de remoção de sólidos na sedimentação e no adensamento do lodo primário é a de Escobar (2001) que em sua tese de doutorado realizou ensaios de sedimentação em colunas de sedimentação misturando lodo adensado de ETA a base de sulfato de alumínio com esgoto sanitário e posterior digestão tanto por processo anaeróbio como por processos aeróbio. As diversas proporções de lodo adensado de ETA com esgoto sanitário apresentaram aumento nos valores de turbidez e de sólidos suspensos na mistura inicial e no sobrenadante clarificado obtido após duas horas de sedimentação. Esse aumento foi proporcional ao da quantidade de lodo de ETA, indicando que, nas proporções testadas, variando de 26% a 86% (razão volumétrica) não seria aconselhável misturar lodo de ETA com esgoto sanitário na fase de decantação primária.

As principais pesquisas relatadas pela AWWA (1996) sobre o efeito na sedimentação primária relatam casos de dosagens de resíduos de ETA de até 50 mg/L que aumentaram a eficiência de remoção de sólidos em suspensão, acima desse valor a eficiência diminuiu (WILSON et al., 1975 apud AWWA, 1996); outros que houve aumento na turbidez e na concentração de sólidos em suspensão no sobrenadante (RINDT, 1973 apud AWWA, 1996). Quanto aos decantadores secundários pode haver um decréscimo da eficiência em decorrência de quantidades elevadas de partículas coloidais (conforme características do lodo de ETA aplicado), como o caso conduzido por Camp Dresser e McKee Inc. em Norfolk, Virginia, onde houve redução na eficiência dos decantadores secundários pelo lançamento do lodo de ETAs na rede coletora de esgotos, resultando na

necessidade de se aumentar a capacidade de clarificação ou de se aplicar de polímero para promover a sedimentação.

Numa pesquisa publicada recentemente, Guan et al (2005) pesquisaram em ensaios de *Jar Test* a remoção de DQO e SS do esgoto sanitário utilizando o lodo produzido em estações de tratamento de água e concluíram que essa prática melhora a eficiência de remoção (tratamento primário) desses parâmetros, isso devido a remoção de partículas pequenas de 48 a 200 μm . E a dosagem de lodo mais apropriada seria de 18 a 20 mg Al/L.

3.3.1.3. Efeitos sobre o intumescimento do lodo

Pouca literatura foi encontrada a respeito da influência sobre o intumescimento do lodo.

As pesquisas sobre tal assunto foram realizadas por Hsu e Pipes (1973) e por Culp e Wilson (1979) apud Guan et al (2005) que observaram uma aparente redução dos problemas de formação de espuma e intumescimento do lodo no decantador secundário. Segundo esses autores, contaminantes liberados pelo lodo de ETA que exercem impactos negativos na remoção de DQO e SS no tratamento primário, podem auxiliar no controle do intumescimento do lodo.

Segundo consta no manual da ASCE e AWWA (1996), Hsu e Pipes (1973) investigaram o efeito do floco de hidróxido de alumínio nas características de sedimentação do efluente primário e secundário e concluiu-se que houve melhora na sedimentabilidade do lodo intumescido, medido pelo IVL (índice volumétrico do lodo), ao se adicionar hidróxido de alumínio, mas sem efeito no IVL de lodo normal. Os autores atribuem no IVL do lodo intumescido ao entrelaçamento (“enmeshment”) do hidróxido de alumínio, que aumentou a densidade e a sedimentabilidade do floco biológico.

3.3.1.4. Efeitos sobre a remoção de fósforo

Muitos pesquisadores da área de ciências dos solos (IPPOLITO et al., 2003; HSU e RENNIE, 1962; LIJKLEMA, 1980; SIMS e ELLIS, 1983 apud GALARNEAU e GEHR, 1997) estudaram a influência do lodo a base de alumínio quando aplicado ao solo e verificaram que o hidróxido de alumínio é capaz de se ligar ao fósforo disponível (fosfatos) para as plantas.

Segundo Ippolito et al (2003) os resultados de pesquisas realizadas para determinar o mecanismo de retenção de fósforo é inconcluso. Uma das hipóteses é a ocorrência de adsorção do fósforo nas interfaces do hidróxido de alumínio. O fosfato substitui um grupo hidroxila (OH^-) e se organiza numa ponte binuclear muito estável entre cátions (BOHN et al, 1985). Como esse processo libera íons OH^- , então, é favorecido em valores de pH baixos. Para tentar determinar esse mecanismo, Ippolito et al (2003) num estudo em laboratório agitaram amostras de lodo de ETA a base de alumínio que continham fósforo (secas e peneiradas em frações de 0,1 a 0,3 mm) de 20 g (base seca) adicionadas a 800 mL de solução de KCl a 0,1 M contendo 300 mg P/L em frascos de 1000 mL e agitadas por diversos períodos (1 a 211 dias). A conclusão mais provável encontrada nesta pesquisa foi de que a associação se deve a adsorção ou a precipitação de fosfato de alumínio amorfo. As análises de difração de raios-X (DRX) e por espectroscopia de comprimento de onda dispersivo (EMPA-WDS) da fração sólida não encontraram formação de fases minerais de fosfato de alumínio ou de cálcio, embora possam estar a concentrações menores que o limite de detecção do método.

Esse resultado só confirmou pesquisa de Galarneau e Gehr (1997) que examinaram a remoção de fósforo em ETes utilizando lodo de ETA e concluíram que a precipitação de fosfato de alumínio, $\text{Al}(\text{PO}_4)$, não é teoricamente possível. Em pH 7, o residual mínimo da concentração de ortofosfato seria de 2.244 mg P/L para estar em equilíbrio com $\text{Al}(\text{PO}_4)$ sólido. Os pesquisadores estudaram também retenção de fósforo em experimentos em batelada com soluções sintéticas e concluíram que o hidróxido de alumínio tem uma significativa capacidade de remoção das diversas formas de fósforo (ortofosfatos, fosfato condensado e fósforo orgânico). Em dosagens de hidróxido de alumínio a 3 mol Al/ mol P (aproximadamente 2,61 mg Al / mg P) produziram remoções na ordem de 70%, 85%

e 15% para ortofosfatos, fosfato condensado e fósforo orgânico, respectivamente. Além disso, concluíram que a remoção do fósforo diminui com o envelhecimento do lodo. Este fenômeno ocorre pelo fato dos sólidos perderem sítios capazes de adsorver ao se transformarem de precipitados amorfos frescos para sólidos cristalinos.

O potencial de remoção de fósforo contido nos efluentes de ETEs pelo lodo de ETA também foi pesquisado no Brasil.

Chao (2006) estudou a remoção de fósforo do efluente de estação de tratamento biológico de esgotos de Barueri (ETE Barueri) utilizando lodo gerado em ETA (do sistema Alto Cotia) que utiliza sulfato de alumínio como coagulante, através de ensaios de *Jar Test*, concentrando-se nas possíveis influências das cargas elétricas das partículas do lodo de ETA, do tempo de permanência do lodo nos decantadores da ETA, do pH, do tempo de mistura e sedimentação, da dosagem do lodo, do uso de polímero na etapa de coagulação/floculação da água bruta e do teor de matéria orgânica no lodo.

Os resultados da pesquisa apontam que os principais fatores intervenientes que influenciaram a remoção de fósforo foram: idade do lodo (remoção máxima com valores de 45 dias, após esse período há um decréscimo gradativo na capacidade de adsorção do fósforo), o tempo de mistura (verificou diferença significativas entre tempo de 30 min e 24 horas, remoção maior para o período maior), a dosagem do lodo (o aumento de concentração de sólidos aumenta a área superficial de adsorção promovendo maior remoção), o pH (menor pH maior remoção) e a presença de polímero (houve redução na remoção do fósforo).

Segundo a autora, a melhor eficiência de remoção (100%) foi obtida com as seguintes condições no ensaio de Jar Test: pH 4,5, tempo de mistura de 15 minutos e gradiente de 40 s^{-1} e com dosagem de lodo de 37 mg lodo/L.

4. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi dividida basicamente em duas etapas:

Primeira etapa: o sistema foi operado como lodo ativado com aeração prolongada em regime estabilizado alimentado somente com esgoto (as condições de operação são detalhadas a seguir);

Segunda etapa: a este sistema estabilizado foi adicionado lodo de ETA de modo que houvesse incremento dos sólidos em suspensão em relação ao esgoto de 25, 50 e 100 mg/L e, para cada concentração, o tempo de estudo seria de aproximadamente 50 dias.

Essas dosagens foram definidas de acordo com os seguintes critérios:

- ❖ Para o desenvolvimento deste estudo foi utilizado o lodo gerado na estação de tratamento de água da cidade de Juquitiba, São Paulo, localizada na Bacia do Rio Ribeira de Iguape. Esta escolha foi tomada em razão, entre outras coisas, do manancial estar localizado em bacia que possui histórico alarmante quanto à contaminação de chumbo e com grande variedade de substâncias minerais, fato que pode refletir na qualidade dos lodos gerados nas ETAs.
- ❖ Estabeleceu-se que toda a população do município atendida com abastecimento de água possui também coleta e tratamento de esgoto. Deste cenário resultou a primeira dosagem de lodo de ETA ao sistema e para isso algumas condições foram assumidas:
 - Assumiu-se um valor típico de contribuição per capita de SS no esgoto em torno de 60 g SS/hab/dia (VON SPERLING, 1996). Este valor de literatura foi assumido devido à impossibilidade prática de caracterização em curto prazo.
 - A contribuição de SS da ETA foi calculada por meio da equação da ASCE (1996), adaptada por FERREIRA FILHO e ALEM SOBRINHO (1998), tendo

como base de dados a ETA da cidade de Juquitiba, utilizando sulfato de alumínio como o coagulante a uma concentração de 15 mg $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$ ou 2,37 mg Al/L e SS na água bruta em torno de 10 mg/L (Anexo 1) resultando em um valor de 5,67 g SS/hab/dia.

Cálculos:

$$P_L = k_1 \cdot q \cdot (4,89 \cdot D_{\text{Al}} + \text{SS} + \text{CAP} + \text{OA}) \cdot 10^{-3}$$

$$P_L = 1,2 \cdot 175 \cdot (4,89 \cdot 2,37 + 10 + 0 + 0) \cdot 10^{-3}$$

$$P_L = 4,53 \text{ g/hab/dia}$$

- Desta forma, a produção de lodo de ETA per capita em relação à contribuição per capita do esgoto de 7,5%. Se o esgoto bruto médio apresenta uma concentração de SS de aproximadamente 230 mg/L, o incremento seria de 17 mg SS/L. Adotou-se para este estudo um incremento inicial de concentração de 25 mg/L.
- ❖ Segundo Diagnóstico de Serviços de Água e Esgoto do ano de 2005 (SNIS, 2005), o índice nacional de atendimento médio urbano para tratamento de esgoto é cerca de três vezes menor que para abastecimento de água. No Estado de São Paulo, onde a Sabesp é a maior de concessionária de serviços sanitários municipais esse índice chega a ser aproximadamente 1,6 vezes menor (SABESP, 2006). Portanto, para as dosagens posteriores decidiu-se por dobrar os incrementos: 50 mg/L, e 100 mg/L.

Para cada dosagem definiu-se um tempo estimado de estudo de 50 dias. Este período foi escolhido por representar duas vezes a idade do lodo determinado para o processo de lodo ativado com aeração prolongada.

4.1 Estação piloto de tratamento de esgotos por lodo ativado

A unidade piloto de lodo ativado com aeração prolongada foi montada no Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos (CTH) da Universidade de São Paulo (USP).

O esgoto sanitário que alimentou o sistema é proveniente do Conjunto Residencial da Universidade de São Paulo (CRUSP) e do Refeitório Central Universitário. O esgoto sanitário é conduzido por uma estação elevatória para a entrada do tratamento preliminar constituído de uma grade mecanizada, uma caixa de areia, uma caixa de gordura adicional e depois segue para o tratamento secundário na unidade piloto (Figura 6).

Figura 6 - Pontos de geração, coleta e tratamento do esgoto utilizado na pesquisa

4.1.1.Descrição da unidade piloto

A unidade piloto foi composta basicamente de um tanque de aeração e de um decantador secundário. Um tanque de solução de bicarbonato de sódio ao lado da bancada forneceu a alcalinidade para a manutenção de um pH na faixa neutra. O lodo de ETA foi armazenado um tanque de acrílico junto ao sistema. Diversas bombas foram utilizadas para o recalque de esgoto, lodo de retorno, alcalinizante e lodo de ETA.

A estação piloto de lodo ativado está representada pela Figura 7.

Figura 7 - Representação fotográfica da unidade piloto de lodo ativado. (a) vista frontal do tanque de aeração e decantador secundário, (b) tanque com solução de barrilha e de lodo de ETA, (c) vista do painel com válvula de controle de ar e controlador do pH e (d) vista lateral do decantador secundário

Abaixo segue a descrição dos principais componentes da unidade piloto:

Tanque de Aeração: construído em acrílico com as seguintes dimensões: 0,45 m de largura, 0,90 m de comprimento e 0,65 m de altura. O volume total é de 263 litros. O volume útil é de 183 litros.

Bomba dosadora de esgoto bruto: o esgoto é introduzido no tanque de aeração por uma bomba dosadora Prominent, modelo Vario VAMB 0763.

Conjunto Medidor/controlador de pH: foi instalado um eletrodo de pH marca Prominent – Dulcotest modelo PHEP 112 SE, conectado a um medidor/controlador da marca Prominent-Dulcometer, modelo D1C, tipo PID, para a dosagem de solução alcalinizante para o controle de pH. Uma bomba dosadora eletromagnética de marca Prominent série gamma 14 tipo 0803, recalca a solução de bicarbonato de sódio até o reator aeróbio. O controlador medidor foi ajustado para manter o pH da massa líquida na faixa de 7,0. A solução de bicarbonato é preparada em uma concentração de 50 g/L.

Fornecimento de ar: produzido por um compressor de ar e distribuído por diversas mangueiras com pedras porosas em suas extremidades fixas no fundo do tanque de modo a promover uma mistura completa. Para o controle da vazão de ar há uma válvula reguladora de pressão com manômetro.

Decantador Secundário: foi construído em acrílico, com forma circular, tem as seguintes proporções: parte superior cilíndrica com altura 1,05 m e diâmetro de 0,50 m e a parte inferior tipo cone invertido, com inclinação nas paredes de, aproximadamente, 60° em relação horizontal e altura de 0,50 m. Há um raspador mecanizado de lodo para remoção do lodo das paredes do decantador que consiste em uma estrutura metálica com bordas de borracha acionada por um conjunto moto-reductor ¼ HP com capacidade de variação da velocidade de rotação.

Bomba de retorno de lodo: bomba Prominent, modelo Vario VAMB 07063, que recalca o lodo até o reator aeróbio.

Bomba dosadora de lodo de ETA: o lodo de ETA foi adicionado por uma bomba dosadora Prominent modelo CONCEPT Cona 1201.

Tanque de armazenamento de lodo de ETA: um tanque de acrílico de capacidade total de 100 litros com agitador mecânico, marca Ética, modelo 104 com motoredutor de ½ HP para garantir que o lodo mantenha-se homogêneo.

4.1.2. Operação do sistema

Para a manutenção do sistema como do tipo aeração prolongada os seguintes parâmetros foram utilizados:

- ❖ Vazão de esgoto afluente: 11L/h
- ❖ Vazão de retorno do lodo: 11L/h
- ❖ Tempo de detenção hidráulica: 16 h
- ❖ Vazão de descarte do lodo: 7,3 L/dia (controle hidráulico)
- ❖ Idade do lodo de referência: 25 dias
- ❖ Concentração de oxigênio dissolvido (OD) no reator: >2,0 mg/L
- ❖ pH: aproximadamente 7,0

Uma rotina operacional foi adotada para a manutenção dessas condições operacionais:

Rotina operacional diária:

- Medição de Vazão: utilizando béquer e cronômetro;
- Medição da concentração de OD: medição com Oxímetro portátil YSI 5100 em diversos pontos do tanque de aeração;
- Descarte de lodo (hidráulico): descarte de lodo de excesso utilizando balde graduado com capacidade de 10 L.

- Medição do volume ocupado pelo lodo em proveta graduada com volume de 1 L durante 30 minutos para avaliar as condições de sedimentabilidade do lodo. Os valores serão utilizados para calcular o índice volumétrico do lodo, IVL₃₀.

$$\text{IVL}_{30} \text{ (mL/g)} = \frac{\text{Volume lodo (mL)} \cdot 10^6}{\text{Volume inicial (mL)} \cdot \text{SS (mg/L)}}$$

4.2. Lodo de ETA utilizado no experimento

O lodo de ETA utilizado na pesquisa foi produzido na estação de tratamento concencional de água da cidade de Juquitiba, SP, localizada na bacia do Rio Ribeira de Iguape./Litoral Sul (UGRH - 11).

A Figura 8 apresenta a bacia hidrográfica e o município de Juquitiba. Esta bacia hidrográfica possui histórico alarmante quanto à contaminação de chumbo, além de ser detentora do mais importante e principal potencial mineral do Estado de São Paulo, com grande variedade de substâncias minerais desde ferrosos, metálicos e preciosos o qual pode refletir na qualidade dos lodos gerados nas ETAs (PIRES, 2003).

Toda a cidade de Juquitiba é protegida pela Lei de Mananciais e ainda engloba o Parque Estadual da Serra do Mar que é Área de Proteção Ambiental. É uma região ainda bastante preservada.

Pelo Relatório de Águas Interiores elaborada pela Cetesb para o ano de 2005, o Rio Juquiá, um dos corpos d'água que atravessam a cidade de Juquitiba, apresentou índice de qualidade das águas para fins de abastecimento público (IAP) como rio de boa qualidade (CETESB, 2005).

Figura 8 - Mapa da bacia hidrográfica do Rio Ribeira de Iguape/Litoral Sul
Fonte: SIGRH e SOS Mata Atlântica

A estação de tratamento de água da cidade de Juquitiba é do tipo convencional, com etapas de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção. O coagulante utilizado no processo de tratamento de água é o sulfato de alumínio (Figura 9).

Figura 9 - O processo de tratamento convencional de água da ETA de Juquitiba (SP)

A coleta do lodo foi realizada manualmente do fundo do decantador quando o operador da estação realiza sua rotina de limpeza dos decantadores. Esse procedimento de lavagem era realizado toda vez que o decantador apresentava bastante comprometido (aproximadamente uma vez por mês). Como este decantador possui placas de aceleração, requer descargas de lodo mais freqüentes para que não haja prejuízos no processo, então, uma descarga rápida era realizada diariamente (Figura 10).

Figura 10 - Representação fotográfica do procedimento de limpeza do decantador na ETA da cidade de Juquitiba. (a) canal de passagem da água floculada para o decantador com o lodo acumulado ao fundo. (b) operador lavando com água pressurizada as placas de aceleração do decantador

Pela rotina operacional e dificuldade logística para se coletar o lodo de ETA freqüentemente, este era coletado em grandes quantidades e armazenado em bombonas de polietileno para uso posterior, tomando o cuidado para mantê-lo longe da incidência do sol, calor, dentre outros fatores.

Para a disposição desse lodo da ETA ao sistema de lodo ativado foi necessária sua preparação (remoção de água ou diluição) para que atingisse uma concentração de sólidos em suspensão em torno de 4.000 mg/L (adequação para que a vazão de dosagem fosse menor que 1% da vazão do esgoto bruto e não afetasse as condições hidráulicas do sistema). Esse lodo de ETA preparado foi armazenado em um tanque de acrílico com volume de aproximadamente 100 litros (Figura 8b) O agitador mecânico acoplado ao tanque de acrílico manteve o lodo de ETA preparado sob leve agitação, para homogeneização constante.

4.3. Caracterização físico-química e o programa de monitoramento

Os pontos de coletas das amostras para a caracterização físico-química estão identificados na Figura 11.

Figura 11 - Esquema geral da unidade piloto de lodo ativado e os pontos de coleta das amostras

O ponto 1 representa o esgoto bruto.

O ponto 2 representa o lodo do tanque de aeração.

O ponto 3 representa o efluente final.

E o ponto 4 representa do lodo de ETA que será dosado ao sistema.

Os principais parâmetros físico-químicos e a frequência de amostragem realizados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Programa de monitoramento do sistema piloto

Parâmetro	Unidade	Pontos de coleta de amostra*	Frequência Amostragem Ponto 1	Frequência Amostragem Ponto 2	Frequência Amostragem Ponto 3	Frequência Amostragem Ponto 4
Temperatura	°C	2	-	diariamente	-	-
pH	-	1, 2, 3	2x/semana	Contínuo	2x/semana	-
Oxigênio Dissolvido	mg/L	2	-	diariamente	-	-
DQO	mg/L	1, 3, 4	2x/ semana	-	2x/ semana	A cada preparo
DBO _{5, 20}	mg/L	1, 3, 4	1 x/semana	-	1 x/semana	A cada preparo
DBO _{5, 20} filtrada	mg/L	3	-	-	1x/semana	-
Série de sólidos	mg/L	1, 2, 3, 4	2x / semana	2x / semana	2x / semana	A cada preparo
N-NTK	mg/L	1, 3	2x / semana	-	2x / semana	A cada preparo
N-NH ₃	mg/L	1, 3	2x / semana	-	2x / semana	-
Nitrato	mg/L	3	2 x / semana	-	2 x / semana	-
Nitrito	µg/L	3	2 x / semana	-	2 x / semana	-
Fósforo total	mg/L	1, 3	2 x / semana	-	2 x / semana	A cada preparo
Fósforo solúvel	mg/L	1, 3	2 x / semana	-	2 x / semana	-
Alcalinidade	mg/L	1, 3, 4	2 x / semana	-	2 x / semana	A cada preparo

* Ponto 1 – Esgoto bruto
 Ponto 2 – Lodo do Tanque de Aeração
 Ponto 3 – Efluente Final
 Ponto 4 – Lodo da ETA

A caracterização das amostras relativa ao processo biológico de tratamento do esgoto sanitário foi realizada no Laboratório de Saneamento “Prof Lucas Nogueira Garcez”, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da USP.

A caracterização do lodo de ETA quanto aos metais e elementos – traços como, alumínio, bário, cádmio, cálcio, chumbo, cloro, cobre, cromo total, ferro total, magnésio, manganês, mercúrio, níquel, potássio, sódio, zinco, sulfato, entre outros foi realizada no Centro de Química e Meio Ambiente do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

4.3.1. Métodos analíticos empregados

Os principais métodos analíticos a serem utilizados estão listados na Tabela 10 e 11 (*Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 19th Edition.*).

Tabela 10 - Principais métodos analíticos e infra-estrutura disponível (continua)

PARÂMETROS	METODOLOGIA	PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS/ INFRA-ESTRUTURA
Demanda Bioquímica de Oxigênio Total (DBO _{5,20})	Técnica das diluições sem sementeira e incubação a 20°C. Determinação de concentrações de OD pelo método eletrométrico e alternativo pelo Método de Winkler modificado pela Azida de Sódio (Iodometria).	Frascos DBO Pyrex, câmara incubadora BOD Mod 347 CD, FANEMI, oxímetro YSI modelo 5100
Demanda Bioquímica de Oxigênio filtrado (DBO _{5,20} filtrado)	Técnica das diluições sem sementeira e incubação a 20°C. Determinação de concentrações de OD pelo método eletrométrico e alternativo pelo Método de Winkler modificado pela Azida de Sódio (Iodometria). A amostra será filtrada em membrana de fibra de vidro de 1,2µm	Frascos DBO Pyrex, câmara incubadora BOD Mod 347 CD, FANEMI, oxímetro YSI modelo 5100
Demanda Química de Oxigênio Total (DQO)	Método convencional de oxidação química com dicromato de potássio catalisada pelo Hg em refluxo aberto. Titulação do excesso de dicromato com sulfato ferroso amoniacal.	Digestor SOXLEHT Nova Ética, vidrarias
Demanda Química de Oxigênio (DQO filtrada)	Método convencional de oxidação química com dicromato de potássio catalisada pelo Hg em refluxo aberto. Titulação do excesso de dicromato com sulfato ferroso amoniacal. A amostra será filtrada em membrana de fibra de vidro de 1,2µm	Digestor SOXLEHT Nova Ética, vidrarias
pH	Método potenciométrico com eletrodo de pH.	pHmetro Orion modelo 720A
Oxigênio dissolvido (OD)	Método eletrométrico com eletrodo de OD.	Oxímetro YSI modelo 5100

Tabela 11 - Principais métodos analíticos e infra-estrutura disponível (conclusão)

PARÂMETROS	METODOLOGIA	PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS/ INFRA-ESTRUTURA
Sólidos Totais (ST), Fixos (STF) e Voláteis (STV)	ST: Evaporação da amostra a 104°C em estufa e pesagem em balança analítica. SF: Calcinação da amostra evaporada em forno mufla a 550-600°C e pesagem em balança analítica. SV: Determinados por diferença (cálculo).	Balança analítica Metler AE 260 Delta Range, cápsula de porcelana, estufa Nova Ética, mufla Brasimet
Sólidos Suspensão Totais (SST), Fixos (SSF) e Voláteis (SSV)	SST: Filtração em filtro-membrana de fibra de vidro de 1,2µm e secagem em estufa a 104°C. SSF: Calcinação da membrana após filtração e secagem em forno mufla a 550 – 600°C. SSV: determinado por diferença (cálculo)	Balança analítica Metler AE 260 Delta Range, sistema de filtração
Sólidos dissolvidos totais (SDT), Fixos (SDF) e Voláteis (SDV)	Determinados por diferença (cálculo) entre as respectivas frações totais e em suspensão	-
Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), Nitrogênio Orgânico e Nitrogênio Amoniacal	Nitrogênio Total: Digestão química do nitrogênio orgânico, destilação da amônia e titulação com H ₂ SO ₄ . Nitrogênio Amoniacal: Destilação da amônia e titulação com H ₂ SO ₄ . Nitrogênio Orgânico: Calculado por diferença a partir dos resultados de NTK e Nitrogênio Amoniacal obtido pelos procedimentos anteriormente descritos.	Digestor, destilador Büchi
Nitrito	Colorimetria com etilenodiamina e sulfanilamida. Leituras absorvância em espectrofotômetro UV-visível	Espectrofotômetro DR 2010
Nitrato	Eletrodo de íon-específico que responde a atividade iônica do Nitrato numa faixa de 0,14 a 1400mgN-NO ₃ /L	Eletrodo íon específico Orion mod 720 A
Fósforo Total e Ortofosfatos	Fósforo Total: Digestão ácida de fosfatos orgânicos e colorimetria (Método do Ácido ascórbico). Ortofosfatos: Colorimetria com reagente combinado (Método do Ácido Ascórbico)	Digestor, espectrofotômetro DR 2010
Metais e elementos macro e micro constituintes	Espectrometria de Fluorescência de Raios-X Laboratório de Análise Química e Ambiental - IPEN	Espectrômetro de Fluorescência de raios-X (WDXRF)
Metais e elementos macro e micro constituintes	Espectrometria de emissão ótica com fonte de plasma de argônio induzido (ICP-OES/AA) Laboratório de Análise Química e Ambiental - IPEN	Espectrômetro de emissão com fonte de plasma (ICP-OES/AA)
Alcalinidade	Titulação potenciométrica de neutralização ácido-base	Vidrarias

4.4. Outros ensaios em laboratório

Nos itens a seguir são descritos outros ensaios que serão realizados em laboratório.

4.4.1. Taxa de consumo de oxigênio aparente (TCO_a)

O ensaio de TCO aparente foi realizado baseando-se na metodologia proposta por VON SPERLING (2002):

- Coletar amostra do reator;
- Medir concentração de oxigênio;
- Elevar a concentração de oxigênio através de forte agitação manual ou com auxílio de um compressor;
- Submeter à agitação suave para impedir sedimentação;
- Medir concentração de oxigênio em intervalos até esta se apresentar aproximadamente constante;
- Plotar os dados em gráfico. A taxa de consumo de oxigênio é a inclinação da linha de melhor ajuste (regressão linear) no gráfico OD x tempo.

4.4.2. Microscopia óptica

A microscopia óptica foi realizada no Laboratório de Saneamento “Prof Lucas Nogueira Garcez”, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica utilizando microscópio óptico Olympus modelo CHS, com aumento de 40 vezes a 1000 vezes. Como esse microscópio não tem câmara fotográfica acoplada, adaptou-se uma câmera digital Nikon Coolpix 4600 para a reprodução fotográfica.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados serão apresentados da seguinte forma: primeiro serão apresentados os resultados do período de operação do sistema sem adição de lodo de ETA, depois os resultados com as dosagens aplicadas individualmente e, por último, os resultados comparativos entre todas as etapas.

5.1 Operação do sistema antes do lançamento do lodo de ETA

O período total de monitoramento do sistema sem adição do lodo de ETA foi de aproximadamente 278 dias. Durante esse período foram realizadas adaptações na unidade piloto, houve período de operação sem controle de pH automatizado devido à danificação de sensor de pH, houve problemas na estação elevatória de esgoto que alimenta o sistema (quebra de bomba e entupimento na rede devido à incrustação de gordura), houve problemas com alguns equipamentos como, destilador de Nitrogênio Amoniacal e digestor de Nitrogênio Total Kjeldahl (utilizado também para digestão do fósforo total). Por esta razão, nesta primeira fase os resultados não estão tão homogêneos e seqüenciais e os parâmetros Fósforo Total, Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) e Nitrogênio Amoniacal apresentam poucos dados em relação às próximas fases.

Os dados que geraram os resultados estatísticos, que serão discutidos neste capítulo, estão apresentados no Anexo 2.

5.1.1. Variáveis controladas em campo

No monitoramento do sistema os seguintes parâmetros foram analisados: temperatura, pH, oxigênio dissolvido (OD) e o índice volumétrico do lodo (IVL₃₀).

Os resultados do período sem disposição de lodo de ETA estão apresentados na Tabela 12, com os valores médios e desvio-padrão, medianas, mínimos, máximos e coeficientes de variação.

Tabela 12 - Dados do monitoramento do sistema sem adição de lodo de ETA

Parâmetro	Ponto	n	média $\pm$ dp	mediana	mín	máx	coef var
Temperatura (°C)	Lodo do Tanque de	57	21 $\pm$ 3	21	16	27	13%
pH		60	7,1 $\pm$ 0,8	7,0	5,0	8,6	11%
OD (mg/L)	Aeração	23	3,6 $\pm$ 1,5	4,0	0,2	6,0	43%
IVL ₃₀ (mL/g)		29	130 $\pm$ 60	107	44	268	46%

Os valores médios de pH de 7,1 e oxigênio dissolvido (OD) de 3,6 mg/L estiveram de acordo com o proposto (pH aproximadamente de 7,0 e OD maior que 2,0 mg/L) para a operação do sistema.

A variação do valor mínimo e máximo de pH de 5,0 e 8,6, respectivamente, no lodo do tanque de aeração ocorreu devido à operação do sistema, durante um período, sem o controle automático da dosagem de alcalinizante. A dosagem foi realizada manualmente.

Com relação a sedimentabilidade do lodo, o valor médio de IVL₃₀ (mL/g) foi de aproximadamente de 130 mL/g. Entretanto, a mediana (medida que não é influenciada por valores atípicos) aponta um valor um pouco menor (107 mg/L). Apesar disso, a sedimentabilidade encontra-se na faixa média (valor de IVL entre 100 a 200 mL/g), segundo a literatura (VON SPERLING, 2002).

As variabilidades dos parâmetros controlados em campo serão comparadas pelo coeficiente de variação por possuírem unidades de medidas diferentes. Os resultados que apresentaram as maiores dispersões foram o oxigênio dissolvido (variação de 43%) e o IVL₃₀ (variação de 46%).

A relação A/M durante este período foi de aproximadamente 0,14 kg DBO/ kg SSVTA.dia, dentro da faixa esperada em sistemas de aeração prolongada (VON SPERLING, 2002).

Para se ter uma visão geral do sistema serão apresentados os resultados dos parâmetros físico-químicos do período sem o lançamento de lodo de ETA em forma de tabelas (Tabelas 13 a 17) com valores de média e desvio padrão, mediana, mínimo e máximo. Também serão apresentados gráficos de série temporal e diagramas *box plot* para análise da variabilidade das amostras, utilizando, principalmente, o intervalo interquartil (diferença entre o primeiro quartil e terceiro quartil) por não sofrerem interferências por valores atípicos (Figuras 12 a 27).

5.1.2. Resultados de DBO_{5,20} e DQO

A Tabela 13 apresenta os parâmetros DBO_{5,20} e DQO contidos no afluente e efluente ao sistema e as eficiências de remoção associadas.

Tabela 13 - Resultados de DBO_{5,20} e DQO sem adição de lodo de ETA

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx
DBO _{5,20} total (mg/L)	Afluente	7	206 ± 84	194	127	362
DBO _{5,20} total (mg/L)	Efluente	5	21 ± 11	19	9	40
DBO _{5,20} filtrado (mg/L)	Efluente	3	7 ± 2	6	6	9
DQO total (mg/L)	Afluente	28	359 ± 122	328	162	713
DQO total (mg/L)	Efluente	30	32 ± 14	31	12	70
DQO filtrado (mg/L)	Efluente	28	18 ± 9	17	7	48
Remoção de DBO _{5,20} (%)	Efic (%)	5	88,3 ± 5,4	86,9	84,3	97,5
Remoção de DQO (%)	Efic (%)	28	90,1 ± 5,2	91,2	79,4	96,8

Os resultados mostram que o sistema piloto de lodo ativado com aeração prolongada apresentou estabilidade na remoção da matéria orgânica, como pode ser observado pelos valores médios da concentração de DQO de 32 mg/L e da concentração de DBO_{5,20} de 21 mg/L no efluente final.

As eficiências médias de remoção de DBO_{5,20} encontrados foram de 88,3% e de DQO total de 90,1%.

Comparando os valores das médias e medianas, observa-se que os resultados são próximos, não havendo distorções nos resultados das médias por eventuais valores atípicos.

A Figura 12 apresenta a concentração de DBO_{5,20} no esgoto bruto e no efluente ao sistema de lodo ativado durante os 278 dias de operação e a eficiência associada.

O gráfico da Figura 12a com as séries temporais das concentrações de DBO_{5,20} afluente e efluente mostra que apesar da concentração no afluente variar entre 127 mg/L (valor mínimo) e 362 mg/L (valor máximo), o efluente sempre manteve concentração abaixo de 50 mg/L. A eficiência de remoção permaneceu com valores entre 84% (valor mínimo) e 98% (valor máximo) (Figura 12b).

Figura 12 - Séries temporais de: (a) concentração de DBO afluente e efluente ao sistema (b) eficiência de remoção associada para a fase sem adição de lodo de ETA

Para caracterizar a variabilidade dos dados obtidos foram construídos diagramas *box plot* (Figura 13).

A Figura 13a mostra que a maior variabilidade dos dados ocorreu para os valores de $DBO_{5,20}$ do afluente, observada pelo intervalo interquartil de aproximadamente 100 mg/L (diferença entre os valores do primeiro e do terceiro quartil). A Figura 13b ilustra o diagrama *box plot* para o efluente total e filtrado separadamente para melhor visualização. O efluente final (total) apresentou dispersão menor nos resultados pelo intervalo interquartil de aproximadamente 3 mg/L, assim como também a eficiência de remoção de $DBO_{5,20}$ com distância interquartil de 3% (Figura 13c).

O valor mediano da concentração de $DBO_{5,20}$ no esgoto bruto foi de aproximadamente 194 mg/L. O efluente final (total) apresentou valor mediano da concentração de $DBO_{5,20}$ de 19 mg/L e valor mediano da concentração de $DBO_{5,20}$

no efluente filtrado de 6 mg/L. Comparando os valores do efluente total e filtrado, verifica-se que não houve problemas de arraste de sólidos, o que poderia contribuir com uma diferença maior entre esses resultados. O valor mediano da eficiência de remoção de matéria orgânica no sistema foi de aproximadamente 87%.

Figura 13 - Séries temporais de: (a) concentração de DBO afluente e efluente ao sistema, (b) concentração efluente total e filtrado e (c) eficiência de remoção associada para a fase sem adição de lodo de ETA

O mesmo comportamento estável do sistema pode ser mais bem observado pela concentração de DQO em razão do maior número de resultados (Figura 14). A concentração de DQO do esgoto bruto variou de aproximadamente 162 mg/L (valor mínimo) a 713 mg/L (valor máximo). O efluente final manteve concentração de DQO abaixo de 50 mg/L na maior parte do período (Figura 14a), exceto por dois valores do efluente final (por volta do 180º dia) que estão acima de 50 mg/L, esse fato possivelmente ocorreu por uma situação atípica onde o esgoto bruto se apresentou séptico e com aspecto esbranquiçado. As eficiências de remoção permaneceram entre 79% a 97% (Figura 14b).

Figura 14 - Séries temporais de: (a) concentração de DQO afluente e efluente ao sistema e (b) eficiência de remoção associada para fase sem lodo de ETA

A Figura 15a apresenta o diagrama *box plot* para a concentração de DQO no esgoto bruto, efluente total e efluente filtrado. A Figura 15b apresenta o diagrama

somente do efluente total e filtrado para melhor visualização. A Figura 15c apresenta o diagrama da eficiência de remoção associada.

Figura 15 - Diagrama *box plot* para: (a) concentração de DQO afluente e efluente ao sistema, (b) concentração de DQO do efluente total e filtrado e (c) a eficiência de remoção associada para fase sem lodo de ETA

A Figura 15a mostra que a maior variabilidade dos dados ocorreu nos valores de DQO do afluente, observada pelo intervalo interquartil de aproximadamente 150 mg/L. O efluente final (total) apresentou dispersão menor nos resultados pelo intervalo interquartil de aproximadamente 20 mg/L (Figura 15b). A eficiência de remoção de DQO apresentou distância interquartil de 7% (Figura 13c).

Pelas distâncias interquartis discutidas acima, entre os dois parâmetros, DBO_{5,20} e DQO, este último apresentou maior variabilidade nos resultados tanto no esgoto bruto como no efluente final.

5.1.3. Resultado de pH e alcalinidade

Com relação ao pH e a alcalinidade encontrada no afluente e efluente, os seguintes valores foram obtidos (Tabela 14).

Tabela 14 - Resultados de pH e alcalinidade para fase sem adição de lodo de ETA

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx	coef var
pH	Afluente	31	7,1 ± 0,3	7,2	6,4	7,7	4%
pH	Efluente	31	6,8 ± 0,6	6,8	5,6	8,1	8%
Alcalinidade (mg/L)	Afluente	25	228 ± 72	202	118	432	32%
Alcalinidade (mg/L)	Efluente	21	87 ± 75	66	8	319	86%

O esgoto bruto apresentou valor médio de pH de aproximadamente 7,1 e de alcalinidade de 228 mg/L.

O efluente final apresentou valor médio de pH de 6,8 e alcalinidade de 87 mg/L. Tanto o coeficiente de variação (86%) como os valores de mínimo (8 mg/L) e máximo (319 mg/L) do parâmetro alcalinidade no efluente final mostram que houve grande variação dos dados, isso se deve a um período de operação do sistema sem o controle automático da dosagem de alcalinizante, como mencionado no item 5.1.1. Durante esse tempo, a dosagem foi realizada manualmente.

5.1.4. Resultados de concentração de sólidos

A Tabela 15 apresenta os valores de sólidos em suspensão para as amostras de esgoto, efluente e lodo do tanque de aeração.

Tabela 15 - Resultados de sólidos em suspensão (totais, voláteis e fixos) sem adição de lodo de ETA

Parâmetro	Ponto	n	média $\pm$ dp	mediana	mín	máx
SST (mg/L)	Afluente	32	114 $\pm$ 62	99	36	302
SST (mg/L)	Efluente	32	14 $\pm$ 10	12	4	50
SST (mg/L)	Tanque Aeração	32	2.257 $\pm$ 397	2.284	1.364	3.116
SSV (mg/L)	Afluente	30	101 $\pm$ 57	88	22	280
SSV (mg/L)	Efluente	30	13 $\pm$ 10	10	5	50
SSV (mg/L)	Tanque Aeração	30	1.918 $\pm$ 337	1.940	1.076	2.456
SSF (mg/L)	Afluente	30	11 $\pm$ 10	10	0	44
SSF (mg/L)	Efluente	30	1 $\pm$ 1	1	0	6
SSF (mg/L)	Tanque Aeração	30	351 $\pm$ 97	332	160	660
SSV/SST	Tanque Aeração	30	0,84 $\pm$ 0,04	0,84	0,76	0,91
Remoção SST (%)	Efic (%)	32	83,1 $\pm$ 24	89,8	0,0	97,4

O efluente final apresentou-se clarificado, com valor médio da concentração de sólidos em suspensão totais de 14 mg/L. A eficiência média de remoção desses sólidos foi de 83,1%.

A concentração média de sólidos em suspensão voláteis no lodo do tanque de aeração durante esse período foi de 1.918 mg SSV/L e os sólidos em suspensão totais foi de 2.257 mg SS/L.

Comparando os valores das médias e medianas, observa-se que os resultados são próximos, não havendo distorções por resultados atípicos.

O grau de mineralização, medido pela relação SSV/SST, apresentou valor médio de 0,84.

Pela literatura, os valores médios da relação SSV/SST encontram-se na faixa de 0,60 a 0,75 para o sistema de aeração prolongada (VON SPERLING, 2002). Esse valor mais alto encontrado da relação SSV/SST para este sistema pode ser devido à parcela de composição do esgoto utilizado ser significativamente de efluente do

restaurante universitário, ou seja, pela contribuição de óleos e graxas, fazendo aumentar o valor dessa relação. Além disso, o esgoto utilizado apresenta baixa concentração de sólidos em suspensão (114 mg/L) o que faz aumentar a relação SSV/SST do lodo. Segundo Von Sperling (2002), para casos em que não haja sólidos em suspensão no esgoto bruto e também não tenha decantador primário essa relação SSV/SST aumenta. Para idade do lodo de 22 dias a relação é de 0,82 e para idade do lodo de 26 dias a relação é de 0,81. Neste caso, a concentração de sólidos do esgoto bruto utilizado é bastante baixa e a sua relação SSV/SST é mais alta (de aproximadamente 0,89) que os valores usuais (0,70 a 0,85).

Com relação ao lodo de retorno do sistema, sua concentração média de sólidos em suspensão (4.389 mg/L) foi de aproximadamente o dobro da concentração do lodo do tanque de aeração (Tabela 16).

Esse resultado confere com a aproximação sugerida por Van Haandel e Marais (1999) para um decantador contínuo sem acumulação de sólidos, ou seja, o fluxo que entra é igual ao fluxo que sai, e com razão de retorno igual a 1, a concentração de lodo de retorno será o dobro da concentração do lodo do tanque de aeração.

Tabela 16 - Resultados de SS, SSV, SSF do lodo de retorno sem adição de lodo de ETA

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx
SSV/SST	Linha retorno	3	0,83 ± 0,08	0,88	0,75	0,88
SST (mg/L)	Linha retorno	4	4.389 ± 2.102	3.726	2.808	7.296
SSV (mg/L)	Linha retorno	3	4.183 ± 2.217	4.008	2.148	6.392
SSF (mg/L)	Linha retorno	3	733 ± 170	732	564	904

Os gráficos de série temporal com os valores de sólidos em suspensão do afluente e efluente ao sistema estão apresentados na Figura 16a. A eficiência de remoção associada está ilustrada na Figura 16b.

O esgoto bruto apresentou variação na concentração de sólidos em suspensão de 36 mg/L a 302 mg/L, mas o sistema removeu eficientemente esses sólidos, mantendo concentrações no efluente final abaixo de 50 mg/L.

A eficiência de remoção desses sólidos variou de uma remoção nula até eficiência de remoção de 97%.

Figura 16 - Séries temporais de: (a) concentração de SS afluente e efluente ao sistema para a fase sem adição de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

Os diagramas *box plot* para o parâmetro sólidos em suspensão estão ilustrados na Figura 17.

A concentração de sólidos em suspensão no esgoto bruto apresentou maior variabilidade com intervalo interquartil de 60 mg/L (Figura 17a) em comparação ao efluente final que apresentou intervalo interquartil de aproximadamente 6 mg/L (Figura 17b).

A eficiência de remoção também apresentou amplitude interquartílica próxima de 10% (Figura 17c).

Figura 17 – Diagrama *box plot* de: (a) concentração de SS afluente e efluente ao sistema, (b) concentração SS efluente e (c) eficiência de remoção associada para a fase sem adição de lodo de ETA

A distribuição dos sólidos no lodo biológico, com sua fração dissolvida e em suspensão, além da parcela volátil e fixa, está apresentada na Figura 18. A maior

parcela dos sólidos é constituída de fração de sólidos em suspensão e volátil. As maiores variações nos sólidos se deram nessas parcelas.

Figura 18 - Diagrama *box plot* das frações dissolvida e em suspensão e também a fração orgânica e inorgânica dos ST no lodo biológico do sistema para a fase sem adição de lodo de ETA

Em relação ao lodo de retorno, houve grande dispersão nos valores de sólidos em suspensão voláteis (amplitude interquartílica de aproximadamente 2.000 mg/L) em comparação aos sólidos em suspensão fixos (amplitude interquartílica de 200mg/L), o que conseqüentemente refletiu na concentração dos sólidos em suspensão totais (amplitude de aproximadamente 2.400 mg/L) (Figura 19).

Figura 19 - Diagrama *box plot* da concentração de SS e a fração orgânica e inorgânica no lodo de retorno do sistema para a fase sem adição de lodo de ETA

Durante a operação do sistema sem o recebimento de lodo de ETA não se detectou a formação de intumescimento filamentososo do lodo. Houve somente um evento pontual de formação de espuma no reator biológico quando o esgoto se apresentou com características atípicas (séptico e coloração esbranquiçada, possivelmente devido a alguma intervenção no restaurante universitário), mas que logo as condições normais foram restabelecidas.

5.1.5. Resultados de nitrogênio e fósforo

Os resultados estatísticos para os parâmetros nitrogênio e fósforo encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultados da série nitrogenada e do fósforo (total e solúvel) sem adição de lodo de ETA

Parâmetro	Ponto	n	média $\pm$ dp	mediana	mín	máx
N-NTK (mg/L)	Afluente	7	59 $\pm$ 14	51	44	81
N-NTK (mg/L)	Efluente	1	2	2	-	-
N-NH ₃ (mg/L)	Afluente	18	52 $\pm$ 16	48	26	80
N-NH ₃ (mg/L)	Efluente	18	1 $\pm$ 1	0	0,2	5
Nitrato (mg/L)	Efluente	28	37 $\pm$ 8	37	25	49
Nitrito (μ g/L)	Efluente	25	510 $\pm$ 603	210	6	1.996
Fósforo Total (mg/L)	Afluente	6	7,1 $\pm$ 1,4	7,4	4,9	8,8
Fósforo Total (mg/L)	Efluente	8	5,3 $\pm$ 1,0	5,4	4,6	6,2
Fósforo Solúvel (mg/L)	Afluente	26	5,3 $\pm$ 1,0	5,3	2,3	7,2
Fósforo Solúvel (mg/L)	Efluente	12	5,3 $\pm$ 0,8	5,4	2,4	6,3
Remoção N-Amoniacal (%)	Efic (%)	16	98,6 $\pm$ 2,0	99,8	93,3	100,0

O processo de nitrificação durante este período mostrou-se estável. Na maior parte das análises a concentração de nitrogênio amoniacal não foi detectada pelo método (valor zero na Tabela 17 e no gráfico da Figura 21). A concentração média do nitrogênio amoniacal no efluente foi de 1 mg/L, porém a mediana apresentou valor zero. O valor máximo de 5 mg/L no efluente foi atípico, alterando o valor da média. A eficiência média de remoção de nitrogênio amoniacal foi de aproximadamente 97%.

Durante este período foi realizada apenas uma análise de nitrogênio Total Kjeldahl, apesar disso, como a maior parte do nitrogênio está na forma amoniacal e o efluente final apresentou baixa concentração média de sólidos (14 mg/L), pode se

dizer que o efluente final deve ter apresentado também baixas concentrações da parcela orgânica de nitrogênio.

A concentração média de nitrato no efluente final foi de 37 mg/L, com valor máximo de 49 mg/L e mínimo de 25 mg/L.

A concentração média de nitrito no efluente final foi pequena (510 $\mu\text{g/L}$), como esperado em razão do valor de pH mantido no sistema (pH 7,0). O valor máximo de nitrito (1.996 $\mu\text{g/L}$) ocorreu devido ao aumento de pH próximo de 8,0 quando a dosagem do alcalinizante foi realizada manualmente.

A concentração média de fósforo total no esgoto bruto foi de 7,1 mg/L e no efluente foi de 5,3 mg/L. Por esses valores médios, a eficiência de remoção do fósforo total neste período foi de aproximadamente 25,4%.

As concentrações médias de fósforo solúvel no esgoto bruto e no efluente tratado foram iguais, com valor de 5,3 mg/L. Então, a eficiência de remoção neste período para este parâmetro foi praticamente nula.

A Figura 20 apresenta a série temporal em relação à concentração de nitrogênio Total Kjeldahl no esgoto bruto e no efluente final (apenas um resultado). Os resultados de nitrogênio Total Kjeldahl no esgoto bruto variaram aproximadamente de 44 mg/L (valor mínimo) a 81 mg/L (valor máximo).

Figura 20 - Série temporal de: (a) concentração de N-NTK afluente e efluente para fase sem adição de lodo de ETA

A Figura 21 apresenta os gráficos temporais em relação à concentração de nitrogênio amoniacal (Figura 21a) e sua eficiência de remoção (Figura 21b) no esgoto bruto e efluente final.

As concentrações de nitrogênio amoniacal no esgoto bruto variaram de 26 (valor mínimo) a 80 mg/L (valor máximo) durante todo o período.

As concentrações de nitrogênio amoniacal no efluente tratado sempre permaneceram próximas de zero. O valor máximo de 5 mg/L (84º dia) foi uma situação atípica, porém, possivelmente, isso se deve a soma de dois fatores: temperatura baixa (16°C) e pH de 6,7. As taxas de nitrificação decaem significativamente abaixo de pH 7,0 e a baixas temperaturas (METCALF e EDDY, 2003; VAN HAANDEL e MARAIS, 1999).

Figura 21 - Séries temporais de: (a) concentração de N-NH₃ afluente e efluente e (b) eficiência de remoção de N-NH₃ para fase sem adição de lodo de ETA

A Figura 22 apresenta os diagramas *box-plot* da concentração de nitrogênio Kjeldahl e amoniacal no esgoto, da concentração de nitrogênio amoniacal no efluente tratado e da eficiência de remoção do nitrogênio amoniacal (a concentração

de nitrogênio Kjeldahl no efluente final não foi apresentada em diagrama *box plot* por haver somente um dado).

Ambos os intervalos interquartis da concentração de nitrogênio Kjeldahl e da concentração de nitrogênio amoniacal no esgoto bruto estão com valor aproximado de 20 mg/L. A dispersão dos dados de concentração de nitrogênio amoniacal no efluente foi ínfima.

A variabilidade dos dados de eficiência de remoção foi de aproximadamente 2% de eficiência.

Figura 22 - Diagrama *box plot* de: (a) concentração de N-NTK afluente e N-NH₃ afluente e efluente ao sistema e (b) eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal para fase sem adição de lodo de ETA

A Figura 23 apresenta as séries temporais das análises de fósforo total.

As concentrações de fósforo total variaram de 4,9 mg/L (valor mínimo) a 8,8 mg/L (valor máximo) no afluente e de 4,6 (valor mínimo) a 6,2 mg/L (valor máximo) no efluente final (Figura 23).

Figura 23 - Série temporal de concentração de fósforo total afluente e efluente ao sistema

Quanto ao fósforo solúvel, os resultados estão apresentados na Figura 24. As concentrações de fósforo solúvel no afluente variaram de aproximadamente 2,3 mg/L (valor mínimo) a 7,2 mg/L (valor máximo) e no efluente final as concentrações de fósforo solúvel variaram de 2,4 mg/L (valor mínimo) a 6,3 mg/L (valor máximo).

Figura 24 - Séries temporais de concentração de fósforo solúvel afluente e efluente ao sistema

Os diagramas *box plot* para os parâmetros fósforo total e solúvel no afluente e efluente estão ilustrados na Figura 25.

A concentração de fósforo total no afluente foi a que apresentou maior variabilidade nos resultados com amplitude interquartílica de aproximadamente 1,4 mg/L, as demais apresentaram amplitude menor que 1,0 mg/L.

Figura 25 - Diagramas *box plot* de concentração de fósforo total e solúvel afluente e efluente ao sistema

.1.6. Taxa de consumo de oxigênio aparente (TCO_a)

O lodo coletado do tanque de aeração foi imediatamente encaminhado para o laboratório onde foi submetido à intensa aeração com o auxílio de bombas de ar do tipo de aquário. Após esse procedimento acondicionou-se essa amostra em um frasco de $\text{DBO}_{5,20}$ juntamente com uma barra magnética. Esse frasco foi colocado em um agitador magnético para produzir um ambiente com leve agitação. Com o auxílio de um oxímetro e um cronômetro os valores de oxigênio dissolvido (OD) foram medidos e registrados na Tabela 18.

Tabela 18 - Valores de OD em função do tempo obtidos durante o ensaio da determinação da taxa de consumo de oxigênio para fase sem adição de lodo de ETA

Tempo (min)	OD (mg/L)	Tempo (min)	OD (mg/L)	Tempo (min)	OD (mg/L)	Tempo (min)	OD (mg/L)	Tempo (min)	OD (mg/L)
0,5	7,0	9,0	6,0	17,5	4,9	26,0	3,8	34,5	2,7
1,0	6,9	9,5	5,9	18,0	4,9	26,5	3,7	35	2,6
1,5	6,9	10,0	5,9	18,5	4,8	27,0	3,7	35,5	2,5
2,0	6,8	10,5	5,8	19,0	4,7	27,5	3,6	36	2,5
2,5	6,8	11,24	5,7	19,5	4,7	28,0	3,5	36,5	2,4
3,0	6,7	11,5	5,7	20,0	4,6	28,5	3,5	37	2,3
3,5	6,7	12,0	5,6	20,5	4,5	29,0	3,4	37,5	2,3
4,0	6,6	12,5	5,6	21,0	4,5	29,5	3,3	38	2,2
4,5	6,6	13,0	5,5	21,5	4,4	30,0	3,3	38,5	2,1
5,0	6,5	13,5	5,4	22,0	4,3	30,5	3,2	39	2,0
5,5	6,4	14,0	5,4	22,5	4,3	31	3,1	39,5	2,0
6,0	6,4	14,5	5,3	23,0	4,2	31,5	3,1	40,0	1,9
6,5	6,3	15,0	5,2	23,5	4,1	32	3,0	40,5	1,9
7,0	6,2	15,5	5,2	24,0	4,1	32,5	2,9	41,0	1,8
7,5	6,2	16,0	5,1	24,31	4,0	33	2,9		
8,0	6,1	16,5	5,1	25,0	3,9	33,5	2,8		
8,5	6,1	17,0	5,0	25,5	3,9	34	2,8		

Os dados da Tabela 18 foram utilizados para construir o gráfico OD versus tempo, que está apresentado na Figura 26.

Para obter a melhor reta entre os pontos foi utilizada análise de regressão linear. A reta obtida da regressão linear apresentou a seguinte equação:

$$y = 0,1294.x + 7,1577$$

A correlação da reta (R^2) aos pontos experimentais foi muito alta, atingindo o valor de 99,95%.

A taxa de consumo de oxigênio é determinada pelo coeficiente angular da reta e, neste caso, o coeficiente angular da reta foi de 0,1294 mg/L.minuto.

Figura 26 - Valores de OD em função do tempo utilizado para determinação da TCO_a no lodo ativado na fase sem adição de lodo de ETA

A Tabela 19 apresenta os valores de TCO_a , em mg/L.h e relaciona com a concentração de SSV presentes no lodo.

Tabela 19 - Resultado da TCO_a no lodo do tanque de aeração, a relação TCO_a/SSV e a concentração de SSV utilizada na fase sem adição de lodo de ETA

Parâmetros	Lodo do Tanque de Aeração
TCO_a (mg/L.h)	8
TCO_a / SSV ($mgO_2/L.h$) / ($mgSSV / L_{lodo}$)	$5,95 \times 10^{-3}$
SSV (mg/L)	1.304

Para lodo do tanque de aeração com concentração de sólidos em suspensão voláteis de 1.304 mg/L, a taxa de consumo de oxigênio aparente (TCO_a) encontrada foi de $5,95 \times 10^{-3}$ ($mgO_2/L.h$)/($mgSSV/L_{lodo}$). Segundo dados da literatura (VAN HAANDEL e MARAIS, 1999), na maioria dos sistemas de lodo ativado a taxa de consumo de oxigênio aparente geralmente se situa na faixa de 30 a 100 mg/L.h (taxa baixa e taxa alta, respectivamente). O valor da TCO aparente obtido neste estudo (de aproximadamente 8 mg/L.h como mostra a Tabela 19) foi bem inferior ao valor indicado para sistema de lodo ativado de baixa taxa. Porém, é preciso levar em consideração que este teste foi realizado na sua versão mais simples (determinação da melhor reta pelos dados de OD em função do tempo durante a interrupção da aeração em uma amostra), e em escala reduzida, sem utilizar fatores de correção. Além disso, não está sendo comparado a TCO específica (a TCO por unidade de massa de lodo), o que seria a mais indicada. O resultado da TCO aparente indica a

atividade metabólica do lodo que, neste caso, apresentou valor baixo por ser um processo de aeração prolongada, na fase endógena da curva de crescimento dos microrganismos.

5.1.7. Microscopia óptica do lodo

A Figura 27 apresenta as reproduções fotográficas dos principais microrganismos encontrados durante o exame microscópico no lodo do tanque de aeração. Foram observados microrganismos existentes em boas condições de depuração como protozoários ciliados pedunculados e livres, rotíferos e anelídeos. Esses microrganismos apresentavam-se esporadicamente entre os flocos.

Figura 27 - Exame microscópico do lodo do tanque de aeração com presença de: (a) e (b) protozoários pedunculados, (c) anelídeos e (d) protozoários ciliados livres entre os flocos

5.2. Operação do sistema recebendo a primeira dosagem de lodo de ETA (25 mg/L)

Nesta fase foi adicionada a primeira dosagem do lodo de ETA produzido na cidade de Juquitiba-SP de modo a haver acréscimo de sólidos em suspensão de 25 mg/L em relação aos sólidos em suspensão presentes no esgoto bruto.

O período de monitoramento da unidade de piloto de lodos ativados sob essa condição foi de aproximadamente 52 dias.

Os dados que geraram os resultados estatísticos, que serão discutidos neste capítulo, estão apresentados no Anexo 3.

Primeiro serão apresentados os resultados da caracterização físico-química do lodo de ETA adicionado e depois da caracterização físico-química do afluente, efluente final, lodo do tanque de aeração e lodo de retorno do sistema.

5.2.1. Caracterização do lodo de ETA adicionado

A Tabela 20 e 21 apresenta a caracterização físico-química do lodo de ETA adicionado à unidade piloto.

Tabela 20 - Caracterização físico-química do lodo de ETA para a primeira dosagem (25 mg/L) (continua)

Parâmetro	Resultado
DBO _{5,20} (mg O ₂ /L)	47
DQO total (mg O ₂ /L)	1.309
ST (mg/L)	4.570
STF (mg/L)	3.340
STV (mg/L)	1.230
SST (mg/L)	4.255
SSF (mg/L)	3.185
SSV (mg/L)	1.070
SDT (mg/L)	315
SDF (mg/L)	155
SDV (mg/L)	160
SSV/SST	0,25

Tabela 21 - Caracterização físico-química do lodo de ETA para a primeira dosagem (25 mg/L) (conclusão)

Parâmetro	Resultado
Fósforo total (mg/L)	5,2
Fósforo solúvel (mg/L)	0,4
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg/L)	31
pH	6,1
Alcalinidade (mg/L) em CaCO ₃	46

A maior parte do lodo de ETA era constituído de sólidos em suspensão, basicamente formados pelo hidróxido de alumínio, neste caso, cerca de 93% dos sólidos totais. E a relação SSV/SST do lodo de ETA utilizado mostra-se coerente com dados da literatura onde esse valor está em torno de 0,25 (CORDEIRO, 1993).

Como relatado por Albrecht (1972), o lodo de ETA é prontamente oxidável, mas muito pouco biodegradável, como se pode observar pelos valores de concentração de DQO de 1.309 mg/L e de DBO_{5,20} de 47 mg/L (Tabela 20).

As concentrações de fósforo total e nitrogênio Kjeldahl foram respectivamente, 5,2 mg/L e 31 mg/L (Tabela 21).

Para este lodo de ETA, o valor de pH encontrado foi de aproximadamente 6,1 e alcalinidade de 46 mg/L em CaCO₃ (Tabela 21).

Nesta fase foi realizada a investigação dos principais elementos constituintes na fase sólida do lodo de ETA pela técnica analítica de espectrometria de fluorescência de raios-X (WDXRF).

A Tabela 22 apresenta os resultados percentuais de metais e elementos-traços encontrados.

Tabela 22 - Caracterização semi-quantitativa por WDXRF do lodo de ETA para a primeira dosagem

Elementos	Teor (%)	Elementos	Teor (%)
Al ₂ O ₃	25,0	Na ₂ O	0,04
SiO ₂	20,6	Cr ₂ O ₃	0,02
Fe ₂ O ₃	16,6	Br	0,01
K ₂ O	1,20	ZnO	0,009
TiO ₂	0,53	NiO	0,007
MnO	0,43	CuO	0,006
SO ₃	0,36	As ₂ O ₃	0,005
P ₂ O ₅	0,33	ZrO ₂	0,004
CaO	0,19	Rb ₂ O	0,003
MgO	0,18	SrO	0,002
Cl	0,16	Nb ₂ O ₅	<0,001

Os principais elementos encontrados neste lodo foram o alumínio (25%), silício (20,6%) e o ferro (16,6%). Essa composição está de acordo com a caracterização realizada por Reis (2006) de amostras de lodo proveniente da ETA da cidade de Juquitiba que continham 27,8% de alumínio e 24,2% de silício e 16,0% de ferro, como os principais elementos.

Outros elementos encontrados foram: potássio (1,2%), titânio (0,53%), manganês (0,43%), enxofre (0,36%), fósforo (0,33%), cálcio (0,19%) e magnésio (0,18%).

Apesar da bacia do Rio Ribeira de Iguape/ Litoral Sul apresentar histórico de contaminação por chumbo e outros metais pesados, não foi observada presença desses elementos neste lodo.

5.2.2. Variáveis controladas em campo

A Tabela 23 apresenta os dados do monitoramento do sistema com o lançamento da primeira dosagem de lodo de ETA ao sistema.

Tabela 23 - Dados do monitoramento operacional com adição de 25 mg/L de lodo de ETA

Parâmetro	Ponto	n	média $\pm$ dp	mediana	mín	máx	coef var
Temperatura (°C)	Tanque de	19	20 $\pm$ 2	20	17	23	10%
pH		22	7,0 $\pm$ 0,1	7,0	6,9	7,4	1%
OD (mg/L)	Aeração	19	3,5 $\pm$ 0,7	3,5	2,0	5,2	20%
IVL ₃₀ (mL/g)		12	87 $\pm$ 14	86	71	109	16%

Os valores médios de pH de 7,0 e oxigênio dissolvido de 3,5 mg/L estiveram de acordo com o proposto para o monitoramento do sistema (pH próximo de 7,0 e OD maior que 2,0 mg/L). Nesta fase, o alcalinizante foi dosado automaticamente no reator, por esta razão o coeficiente de variação para o pH foi somente de 1%.

Durante este período o IVL₃₀ foi de aproximadamente de 87 mL/g. Segundo Von Sperling (2002), esse valor está na faixa da boa sedimentabilidade do lodo (valor de IVL entre 50 a 100 mL/g). Isso indica uma possível melhora na sedimentabilidade do lodo, o valor médio de IVL₃₀ diminuiu de 130 (na etapa anterior) para 87 mL/g.

A relação A/M neste período ficou em 0,17 kg DBO/kgSSVTA.dia, valor próximo da faixa esperada em sistemas de aeração prolongada.

Durante este período não houve qualquer alteração no controle operacional do sistema, como, por exemplo, na idade do lodo.

5.2.3. Resultados de DBO_{5,20} e DQO

A Tabela 24 apresenta a estatística dos valores de DBO_{5,20} e de DQO do afluente e efluente ao sistema que recebeu a primeira dosagem de lodo de ETA (25mg/L).

Tabela 24 - Resultados de DBO_{5,20} e DQO na primeira dosagem (25 mg/L)

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx
DBO _{5,20} (mg/L)	Afluente	7	227 ± 55	225	154	318
DBO _{5,20} (mg/L)	Efluente	7	7 ± 2	8	5	10
DQO total (mg/L)	Afluente	14	353 ± 103	324	259	676
DQO total (mg/L)	Efluente	14	35 ± 9	35	22	56
DQO filtrada (mg/L)	Efluente	10	24 ± 9	24	9	40
Remoção de DBO (%)	Efic (%)	7	96,8 ± 0,8	96,5	96,0	98,2
Remoção de DQO (%)	Efic (%)	14	89,4 ± 3,6	89,3	79,5	94,6

Os resultados mostram que o sistema, mesmo com a introdução de 25 mg/L do lodo gerado na ETA da cidade de Juititaba, continuou apresentando estabilidade na remoção da matéria orgânica. Durante este período, o efluente final apresentou concentrações médias de DBO_{5,20} de 7 mg/L e de DQO de 35 mg/L e eficiências médias de 96,8% e 89,4%, respectivamente. Os valores das medianas estão próximos da média, o que indica que não houve valores atípicos neste período.

Os valores da concentração de DQO no efluente total (35 mg/L) e filtrado (24 mg/L) estão próximos, o que revela que não houve problemas com arraste de sólidos em suspensão.

A Figura 28 apresenta a série temporal da concentração de DBO_{5,20} no esgoto bruto e no efluente final. As concentrações de DBO_{5,20} no esgoto bruto variaram de 154 mg/L (valor mínimo) a 318 mg/L (valor máximo) e no efluente tratado de 5 mg/L

(valor mínimo) a 10 mg/L (valor máximo). As eficiências de remoção de $\text{DBO}_{5,20}$ permaneceram com valores entre 96% (valor mínimo) a 98,2% (valor máximo).

(a)

(b)

Figura 28 - Séries temporais de: (a) concentração de $\text{DBO}_{5,20}$ afluente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

Os diagramas *box plot* para o parâmetro $\text{DBO}_{5,20}$ estão ilustrados na Figura 29. A variabilidade dos resultados foi maior na concentração de $\text{DBO}_{5,20}$ do esgoto bruto que apresentou intervalo interquartil de aproximadamente 60 mg/L em comparação à concentração no efluente final com intervalo de 3 mg/L (Figura 29a e 29b). A eficiência de remoção da $\text{DBO}_{5,20}$ apresentou dispersão com intervalo interquartil de aproximadamente de 1% (Figura 29c).

Figura 29 - Diagrama *box plot* de: (a) concentração de DBO afluente e efluente, (b) concentração de DBO efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA e (c) eficiência de remoção associada

Pela Figura 30a pode-se observar que os valores da concentração de DQO no esgoto bruto variaram de 259 mg/L (mínimo) a 676 mg/L (máximo) e as concentrações no efluente final que permaneceram abaixo de aproximadamente 50 mg/L. As eficiências de remoção estiveram em torno de 90% (Figura 30b).

Figura 30 - Séries temporais de: (a) concentração de DQO afluente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

As concentrações de DQO no esgoto bruto durante este período estão menos dispersivos (Figura 31a), a amplitude interquartilica foi de aproximadamente 70 mg/L. Os valores da concentração de DQO no efluente (total) apresentaram amplitude de 10 mg/L e os valores da eficiência de remoção apresentaram amplitude de 3% (Figuras 31b e 31c).

Figura 31 - Diagrama *box plot* de: (a) concentração de DQO afluyente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA, (b) concentração de DQO efluente e (b) eficiência de remoção associada

5.2.4. Resultados de pH e alcalinidade

A Tabela 25 apresenta os valores de pH e alcalinidade do afluente e do efluente ao sistema.

Tabela 25 - Resultados de pH e alcalinidade na primeira dosagem de lodo de ETA

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx	coef var
pH	Afluente	14	7,1 ± 0,2	7,0	6,7	7,5	3%
pH	Efluente	14	7,2 ± 0,2	7,2	6,8	7,5	2%
Alcalinidade (mg/L)	Afluente	14	203 ± 29	205	153	263	14%
Alcalinidade (mg/L)	Efluente	14	126 ± 35	130	88	198	27%

O esgoto bruto apresentou pH médio de 7,1 e alcalinidade de 203 mg/L e o efluente final apresentou pH de 7,2 e alcalinidade de 126 mg/L.

Neste período como a dosagem do alcalinizante no sistema foi automática, os parâmetros pH e alcalinidade foram controlados de maneira mais adequada, sem grandes variações, como se pode observar pelos valores dos coeficientes de variação desta etapa (Tabela 25) em comparação com os valores do período anterior onde o coeficiente de variação do pH foi de 8% e da alcalinidade de 86% (Tabela 14).

5.2.5. Resultados de concentração de sólidos

As Tabelas 26 e 27 apresentam os resultados em relação aos sólidos em suspensão do sistema.

Tabela 26 - Resultados de sólidos em suspensão (totais, voláteis e fixos) na primeira dosagem de lodo de ETA (continua)

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx
SST (mg/L)	Afluente	13	144 ± 70	134	86	348
SST (mg/L)	Efluente	13	18 ± 7	17	5	32
SST (mg/L)	Tanque de aeração	13	2.362 ± 530	2.148	1.696	3.276
SSV (mg/L)	Afluente	13	120 ± 60	98	48	288

Tabela 27 - Resultados de sólidos em suspensão (totais, voláteis e fixos) na primeira dosagem de lodo de ETA (conclusão)

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx
SSV (mg/L)	Efluente	13	14 ± 7	12	5	26
SSV (mg/L)	Tanque de aeração	13	1.776 ± 369	1.740	1.292	2.436
SSF (mg/L)	Afluente	13	24 ± 24	18	6	86
SSF (mg/L)	Efluente	13	4 ± 3	4	0	10
SSF (mg/L)	Tanque de aeração	13	586 ± 196	516	304	840
SSV/SST	Tanque de aeração	13	0,76 ± 0,05	0,74	0,71	0,85
Remoção SS (%)	Efic (%)	13	84,8 ± 9,7	85,8	62,8	97,1

O sistema piloto apresentou estabilidade na remoção dos sólidos em suspensão. A concentração média no efluente tratado foi de 18 mg/L.

A concentração média de sólidos em suspensão no lodo biológico foi de 2.362 mg/L. A parcela volátil (SSV) foi de 1.776 mg/L. Houve aumento na concentração de sólidos em suspensão totais (pela adição de SST do lodo de ETA) e sólidos em suspensão volátil em comparação a etapa anterior (Tabela 15). Esse aumento na concentração de SSV pode ter ocorrido pelo aporte de sólidos do lodo da ETA que auxiliou a formação do floco, agregando mais microrganismos.

A relação SSV/SST do lodo do tanque de aeração diminuiu de um valor médio de 0,84 (Tabela 15) para 0,76 (Tabela 27). Isso pode ser atribuído à adição de lodo de ETA que praticamente é constituído de compostos inorgânicos (75% de SSF).

A eficiência média de remoção de sólidos em suspensão totais (SS) no sistema foi de 84,8%.

Os resultados de sólidos em suspensão no lodo de retorno estão apresentados na Tabela 27.

A concentração média de sólidos em suspensão no lodo de retorno foi de 5.456 mg/L. Esse valor é cerca de pouco mais que o dobro do valor de SS do lodo do tanque de aeração e a relação SSV/SST bem próxima a este (Tabela 28).

Tabela 28 - Resultados de SS, SSV, SSF do lodo de retorno na primeira dosagem de lodo de ETA

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx
SSV/SST	Linha retorno	2	0,74 ± 0,03	0,74	0,71	0,76
SS (mg/L)	Linha retorno	2	5.456 ± 792	5.456	4.896	6.016
SSV (mg/L)	Linha retorno	2	4.040 ± 764	4.040	3.500	4.580
SSF (mg/L)	Linha retorno	2	1.416 ± 28	1.416	1.396	1.436

A Figura 32 apresenta os gráficos das séries temporais para os sólidos em suspensão no afluente e efluente ao sistema (Figura 32a) e para a eficiência de remoção associada (Figura 32b). As concentrações de SS no esgoto bruto variaram de 86 (valor mínimo) a 348 mg/L (valor máximo) e as concentrações de SS no efluente final variaram de 5 mg/L (valor mínimo) a 32 mg/L (valor máximo). Os resultados de eficiência de remoção dos sólidos em suspensão variaram de 62,8% (mínimo) a 97,1% (máximo).

Figura 32 - Séries temporais de: (a) concentração de SS afluente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

A variabilidade das concentrações de sólidos em suspensão no afluente e efluente e da eficiência de remoção associada pode ser observada pela Figura 33.

Figura 33 - Diagrama *box plot* de: (a) concentração de SS afluente e efluente, (b) concentração de SS efluente e (c) eficiência de remoção associada com 25 mg/L de lodo de ETA

A Figura 33a mostra que a maior dispersão dos dados ocorreu para os valores de concentração de SS no esgoto bruto pelo intervalo interquartil de aproximadamente 70 mg/L. A variabilidade das concentrações de SS no efluente foi menor com valor aproximado de 6 mg/L e está ilustrada na Figura 33b. A eficiência de remoção apresentou intervalo interquartil de aproximadamente 11% (Figura 33c).

Com relação à distribuição dos sólidos no lodo do tanque de aeração, a Figura 34 apresenta a fração dissolvida e em suspensão e, também, a fração orgânica e inorgânica dos sólidos totais. A maior parte do lodo biológico é composto de sólidos em suspensão e voláteis e a menor contribuição dos sólidos se refere à parcela dissolvida e fixa.

A maior dispersão dos dados ocorreu na fração de sólidos em suspensão que apresentou amplitude interquartílica de 900 mg/L, refletindo na dispersão dos valores das concentrações de sólidos totais (amplitude de aproximadamente 700 mg/L).

Figura 34 - Diagrama *box plot* da fração dissolvida e em suspensão e também da fração orgânica e inorgânica do lodo biológico com 25 mg/L de lodo de ETA

Durante esta etapa da pesquisa não se observou em nenhum momento formação de intumescimento filamentoso do lodo ou de espuma no reator biológico.

5.2.6. Resultados de nitrogênio e fósforo

A Tabela 29 apresenta os resultados da série nitrogenada e do fósforo.

Tabela 29 - Resultados da série nitrogenada e do fósforo (total e solúvel) na primeira dosagem (25 mg/L)

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx
N-NTK (mg/L)	Afluente	13	59 ± 13	60	45	86
N-NTK (mg/L)	Efluente	13	2 ± 2	2	0	6
N-NH ₃ (mg/L)	Afluente	14	50 ± 9	50	34	70
N-NH ₃ (mg/L)	Efluente	14	1 ± 1	0	0	4
Nitrato (mg/L)	Efluente	12	23 ± 3	22	20	28
Nitrito (µg/L)	Efluente	14	573 ± 381	337	139	1.267
Fósforo Total (mg/L)	Afluente	13	7,4 ± 1,2	7,5	5,3	10,3
Fósforo Total (mg/L)	Efluente	13	5,5 ± 0,7	5,4	4,6	6,9
Fósforo Solúvel (mg/L)	Afluente	13	5,5 ± 1,1	5,5	3,3	7,9
Fósforo Solúvel (mg/L)	Efluente	9	5,0 ± 0,9	4,9	3,8	6,5
Remoção NKT (%)	Efic (%)	13	96,1 ± 4,3	97,0	87,4	100,0
Remoção N-NH ₃ (%)	Efic (%)	14	98,3 ± 3,0	100,0	90,8	100,0

Os resultados mostram que a nitrificação não foi afetada pela introdução de lodo de ETA ao sistema biológico. O processo de nitrificação apresentou estabilidade durante o período, com concentração média de nitrogênio amoniacal de 1 mg/L e mediana apresentando valor zero no efluente final. A concentração média de nitrogênio Kjeldahl no efluente final foi de 2 mg/L e muitas vezes também não foi detectada pelo método. As concentrações médias de nitrogênio Kjeldahl e amoniacal no esgoto bruto foram de 59 mg/L e 50 mg/L, respectivamente. Em relação às eficiências, a média de remoção de nitrogênio amoniacal foi da ordem de 98,3% e de nitrogênio Kjeldahl foi de 96,1%. Comparando-se estes resultados com os da etapa anterior (98,6% para o nitrogênio amoniacal e 96,9 % para o nitrogênio Kjeldahl) observa-se que os valores das eficiências de remoção estão bem próximos.

Em relação ao nitrato, seu valor médio foi de 23 mg/L, com valores máximo de 28 mg/L e mínimo de 20 mg/L. A concentração média de nitrito manteve-se baixo (573 µg/L), o que era esperado.

As concentrações médias de fósforo total e solúvel no efluente final apresentaram valores próximos, para o fósforo total de 5,5 mg/L e para o fósforo solúvel de 5,0 mg/L.

A eficiência de remoção de fósforo total neste período pelas concentrações médias foi de 25,7% e a eficiência de remoção de fósforo solúvel foi de 9,1%. Houve um aumento na eficiência de remoção de fósforo solúvel se comparado ao período anterior (o período sem adição de lodo de ETA não apresentou remoção desse parâmetro).

A Figura 35 apresenta os gráficos das séries temporais do nitrogênio Kjeldahl afluente e efluente ao sistema e a eficiência de remoção associada.

Figura 35 - Séries temporais de: (a) concentração de nitrogênio total Kjeldahl afluente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

As concentrações de nitrogênio Kjeldahl no esgoto bruto variaram de 45 mg/L (mínimo) a 86 mg/L (máximo). O efluente final apresentou concentrações abaixo de

10 mg/L. As eficiências de remoção variaram de 87,4% (mínimo) a 100% (máximo). A eficiência de 87,4% (8º dia) ocorreu por um pequeno arraste de lodo no decantador secundário (o sistema de raspagem do lodo começou a apresentar problemas) e a eficiência de 87,8% (15º dia) ocorreu por problemas no dia anterior com o compressor que fornecia ar para o sistema.

A Figura 36 mostra o gráfico do parâmetro nitrogênio amoniacal. As concentrações de nitrogênio amoniacal no afluente variaram de 34 mg/L (mínimo) a 70 mg/L (máximo). As concentrações no efluente permaneceram abaixo de 5 mg/L em todo o período. As eficiências de remoção apresentaram valores acima de 90%. As eficiências mais baixas do período de 90,8% e 92,6% nos dias 15º e 17º ocorreram por problemas no compressor de ar.

Figura 36 - Séries temporais de: (a) concentração de nitrogênio amoniacal afluente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

Os diagramas *box plot* para a concentração de nitrogênio Kjeldhal e de nitrogênio amoniacal no esgoto bruto e efluente final estão apresentados na Figura 37.

No afluente, a forma de nitrogênio que apresentou maior variabilidade nos dados foi o nitrogênio Kjeldhal com intervalo interquartil de 17 mg/L. A concentração de nitrogênio amoniacal no afluente apresentou amplitude interquartílica de 10 mg/L (Figura 37a). No efluente também a maior dispersão ocorreu no nitrogênio na forma Kjeldahl com amplitude de 3 mg/L, a amplitude para o nitrogênio amoniacal foi próxima de zero (Figura 37a). O mesmo caso para as eficiências de remoção, onde a amplitude interquartílica para o nitrogênio Kjeldahl foi de 6% e para o nitrogênio amoniacal foi de 1% (Figura 37b).

Figura 37 - Diagrama *box plot* de: (a) concentração de nitrogênio NKT e NH₃ afluente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

A Figura 38 apresenta a série histórica dos resultados da concentração de fósforo total no afluente e efluente ao sistema com a adição da primeira dosagem de lodo de ETA (25 mg/L). A concentração de fósforo total no afluente variou de aproximadamente 5,3 mg/L (valor mínimo) a 10,3 mg/L (valor máximo) e no efluente final de 4,6 mg/L (mínimo) a 6,9 mg/L (máximo) durante todo o período (Figura 38).

Figura 38 - Séries temporais de concentração de fósforo total afluente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA

Os resultados da série temporal da concentração de fósforo na forma solúvel (ortofosfatos) estão apresentados na Figura 39. As concentrações de ortofosfatos no afluente variaram de 3,3 mg/L (mínimo) a 7,9 mg/L (máximo) e no efluente final de 3,8 mg/L (mínimo) a 6,5 mg/L (máximo).

Figura 39 - Séries temporais de concentração de fósforo solúvel afluente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA

Os diagramas *box plot* para as formas de fósforo contidas no esgoto bruto e efluente final estão ilustrados na Figura 40.

Figura 40 - Diagrama *box plot* de concentração de fósforo total e solúvel afluente e efluente ao sistema com 25 mg/L de lodo de ETA

No esgoto bruto, a maior variabilidade ocorreu na concentração de fósforo total com intervalo interquartil de 1 mg/L enquanto que a forma solúvel não apresentou dispersão nos resultados. No efluente, ao contrário, a maior dispersão ocorreu na forma solúvel com intervalo interquartil maior que 1 mg/L, a concentração de fósforo total no efluente apresentou intervalo menor que 1 mg/L.

5.2.7. Taxa de consumo de oxigênio aparente (TCO_a)

Os valores de oxigênio dissolvido (OD) foram medidos com o auxílio de um oxímetro e um cronômetro e registrados na Tabela 30.

Tabela 30 - Valores de OD em função do tempo obtidos durante o ensaio da determinação da taxa de consumo de oxigênio do lodo com a primeira dosagem

Tempo (min)	OD (mg/L)	Tempo (min)	OD (mg/L)	Tempo (min)	OD (mg/L)	Tempo (min)	OD (mg/L)	Tempo (min)	OD (mg/L)
0,5	7,0	6,0	5,9	11,5	4,8	17,0	3,6	22,5	2,4
1,0	6,9	6,5	5,8	12,0	4,7	17,5	3,5	23,0	2,3
1,5	6,8	7,0	5,7	12,5	4,6	18,0	3,4	23,5	2,2
2,0	6,7	7,5	5,6	13,0	4,4	18,5	3,3	24,0	2,1
2,5	6,6	8,0	5,5	13,5	4,3	19,0	3,1	24,31	2,0
3,0	6,6	8,5	5,4	14,0	4,2	19,5	3,1	25,0	1,9
3,5	6,4	9,0	5,3	14,5	4,1	20,0	2,9	25,5	1,8
4,0	6,4	9,5	5,2	15,0	4,0	20,5	2,8		
4,5	6,2	10,0	5,1	15,5	3,9	21,0	2,7		
5,0	6,1	10,5	5,0	16,0	3,8	21,5	2,6		
5,5	6,0	11,24	4,9	16,5	3,7	22,0	2,5		

A partir dos valores obtidos na Tabela 29 foi construído o gráfico OD versus tempo (Figura 41).

Figura 41 - Valores de OD em função do tempo utilizado para determinação da TCO_a no lodo ativado com 25 mg SST/L de lodo de ETA

Para obter a melhor reta entre os pontos foi utilizada a análise de regressão linear.

A partir dessa análise foi obtida a seguinte equação: $y = -0,2114.x + 7,1838$.

A correlação da reta (R^2) aos pontos experimentais foi muito alta, atingindo valor de 99,98%.

A taxa de consumo de oxigênio, que é determinada pelo coeficiente angular da reta, foi de 0,2114 mg/L.minuto ou 13 mg/L.hora.

A Tabela 31 apresenta os valores de TCO_a em mg/L.hora e a relaciona com a concentração de sólidos em suspensão voláteis presentes no lodo.

Tabela 31 - Resultado da TCO_a no lodo do tanque de aeração, a relação TCO_a/SSV e a concentração de SSV utilizada na primeira dosagem (25mg/L)

Parâmetros	Lodo do Tanque de Aeração
TCO_a (TCO_a mg/L.h)	13
TCO_a / SSV ($mgO_2/L.h$) / ($mgSSV / L_{lodo}$)	$6,24 \times 10^{-3}$
SSV (mg/L)	2.032

Comparando o resultado da taxa de consumo de oxigênio específica (TCO_a/SSV) encontrado antes do lançamento do lodo de ETA que foi de $5,95 \times 10^{-3}$ ($mgO_2/L.h$)/($mgSSV/L_{lodo}$) com o resultado obtido nesta etapa da pesquisa (Tabela 31) pode-se dizer que não houve inibição dos microrganismos normalmente presentes pela introdução de 25 mg/L de lodo de ETA ao processo de lodo ativado.

O valor da TCO_a específica encontrada nesta fase foi um pouco maior que a determinada no sistema sem o lançamento de lodo de ETA.

Houve aumento também na concentração de sólidos em suspensão voláteis no tanque de aeração. Tal fato pode ter ocorrido pelo aporte de sólidos do lodo da ETA que auxiliou a formação do floco, agregando mais microrganismos e, portanto, aumentando o valor da TCO_a específica.

5.2.8. Microscopia óptica do lodo

A Figura 42 apresenta o exame microscópico realizado no lodo durante este período.

Figura 42 - Exame microscópico do lodo do tanque de aeração com presença de: (a) protozoário pedunculado, (b) anelídeo, (c) rotífero e (d) protozoário ciliado livre

Foi verificada a presença dos mesmos microrganismos existentes no sistema piloto de lodo ativado antes do lançamento do lodo de ETA, como protozoários ciliados pedunculados (Figura 42a), anelídeos (Figura 42b), rotíferos (Figura 42c) e protozoários ciliados livre-natantes (Figura 42d).

Pode-se observar que, aparentemente, não houve alterações perceptíveis na microfauna pelo lançamento de lodo de ETA na concentração de 25 mg/L ao sistema de lodo ativado.

5.3. Operação do sistema recebendo a segunda dosagem de lodo de ETA (50mg/L)

Nesta fase foi adicionado o lodo da ETA da cidade de Juquitiba, SP, de modo a haver acréscimo de sólidos em suspensão de 50 mg/L em relação aos sólidos presentes no esgoto bruto.

O período efetivo de estudo foi de aproximadamente 50 dias, porém com alguns intervalos entre os resultados devido a problemas na disponibilidade de esgoto e nos equipamentos da unidade piloto.

Os dados que geraram os resultados estatísticos, que serão discutidos neste capítulo, estão apresentados no Anexo 4.

5.3.1. Caracterização do lodo de ETA adicionado

A Tabela 32 apresenta a caracterização físico-química do lodo de ETA utilizado nesta etapa da pesquisa.

Tabela 32 - Caracterização físico-química do lodo de ETA para a segunda dosagem

Parâmetro	Resultados
DQO total (mg/L)	1.476
SST (mg/L)	4.260
SSF (mg/L)	3.120
SSV (mg/L)	1.140
Fósforo total (mg/L)	3,4
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg/L)	32
SSV/SST	0,27
pH	5,7

A relação SSV/SST do lodo de ETA utilizado mostrou-se coerente com dados da literatura onde esse valor está em torno de 0,25 (CORDEIRO, 1993).

Com relação à investigação dos elementos metálicos e não-metálicos contidos no lodo de ETA, anteriormente, havia sido analisada somente a fase sólida do lodo por meio da técnica analítica de espectrometria de fluorescência de raios-X

(WDXRF). Desta vez foi realizada também análise da fase líquida pela técnica de espectrometria de emissão ótica com fonte de plasma de argônio induzido (ICP-OES/AA) para verificar a ocorrência de elementos dissolvidos que poderiam trazer prejuízos ao processo biológico.

A Tabela 33 apresenta os resultados percentuais da composição em termos de metais para a fase sólida.

Tabela 33 - Caracterização semi-quantitativa por WDXRF do lodo de ETA para a segunda dosagem

Elemento	Teor (%) média ± dp	Elemento	Teor (%) média ± dp
Al ₂ O ₃	39,0 ± 0,5	Cl	0,52 ± 0,08
SiO ₂	30,4 ± 0,5	Na ₂ O	0,07 ± 0,002
Fe ₂ O ₃	25,7 ± 0,5	Cr ₂ O ₃	0,02 ± 0,002
K ₂ O	1,60 ± 0,3	ZnO	0,018 ± 0,002
TiO ₂	0,69 ± 0,05	NiO	0,010 ± 0,001
MnO	0,25 ± 0,05	CuO	0,007 ± 0,001
SO ₃	0,79 ± 0,08	ZrO ₂	0,007 ± 0,001
P ₂ O ₅	0,50 ± 0,08	Rb ₂ O ₃	0,005 ± 0,001
CaO	0,06 ± 0,002	Ga ₂ O ₃	0,009 ± 0,001
MgO	0,21 ± 0,08		

Assim como nos resultados da análise realizada no lodo de ETA utilizado na fase anterior (Tabela 22), os principais elementos encontrados neste lodo foram o alumínio (39,0%), silício (30,4%) e o ferro (25,7%). Os demais elementos encontrados foram: potássio (1,6%), titânio (0,69%), manganês (0,25%), enxofre (0,79%), fósforo (0,5%) e magnésio (0,21%), entre outros. Também não foram encontrados presença de chumbos e outros metais pesados.

A análise de metais e elementos-traços existentes na fase líquida do lodo de ETA está apresentada nas Tabelas 34 e 35.

Tabela 34 - Concentrações de metais e elementos-traços detectadas por ICP-OES/AA do lodo de ETA (continua)

Elemento	Concentração (µg/mL)	Elemento	Concentração (µg/mL)	Elemento	Concentração (µg/mL)
B	<0,004	Li	0,002 ± 0,001	K	0,703 ± 0,001
Al	0,680 ± 0,05	Be	<0,002	Ag	<0,002
V	<0,03	Mg	0,735 ± 0,005	Cd	<0,0001
Cr	<0,01	P	0,084 ± 0,003	Pb	<0,001

Tabela 35 - Concentrações de elementos traços detectadas por ICP-OES/AA do lodo de ETA (conclusão)

Elemento	Concentração (µg/mL)	Elemento	Concentração (µg/mL)	Elemento	Concentração (µg/mL)
Mn	17,0 ± 0,1	Ca	3,74 ± 0,01	Sb	<0,001
Ni	<0,01	Fe	0,672 ± 0,013	Se	<0,001
Cu	<0,02	Ba	0,090 ± 0,001	As	<0,001
Zn	0,003 ± 0,0003	Co	<0,01		
Mo	<0,01	Na	1,49 ± 0,001		
Sn	<0,06	Si	1,72 ± 0,01		

O elemento que apresentou maior concentração na fase líquida foi o manganês (Mn) com concentração de 17 µg/mL. O manganês é um dos micronutrientes de importância ao crescimento biológico (METCALF e EDDY, 2003) e, portanto, a princípio, sua presença não gera uma preocupação imediata, mas é preciso saber se essa concentração pode interferir em algum processo biológico.

Esse resultado confere com pesquisa realizada por Reis (2006) que analisou metais solúveis no descarte do lodo de decantador na ETA da cidade de Registro (SP), localizada também na Bacia do Rio Ribeira de Iguape/Litoral Sul, e encontrou concentração de Mn de 16 mg/L na segunda hora do processo de lavagem do decantador. Reis (2006) investigou a origem desse elemento e constatou que a presença de Mn encontrado no lodo da ETA estava relacionada com algum insumo utilizado durante as operações de tratamento de água e que possivelmente esse insumo era o coagulante sulfato de alumínio.

A presença de metais na fase solúvel pode ser atribuída às condições anaeróbias ou de baixo pH nos sólidos depositados no fundo dos decantadores. Quando esses sólidos são perturbados, como durante a lavagem dos decantadores, essas frações solúveis são liberadas na água de despejo (FURREY et al, 2000).

A presença de Mn no lodo de ETA utilizado na pesquisa se deve a dois fatores: ao insumo utilizado (tanto a ETA da cidade de Juquitiba (SP) que gerou o lodo da pesquisa como a ETA da cidade de Registro (SP) são gerenciadas pela mesma unidade de negócios da Sabesp - Unidade de Negócios do Vale do Ribeira e utilizam o mesmo coagulante, no caso, o sulfato de alumínio) e às condições de anaerobiose ou de pH baixo no lodo do fundo do decantador que favorecem a liberação de metais na forma solúvel.

5.3.2. Variáveis controladas em campo

No monitoramento do sistema os seguintes parâmetros foram analisados: temperatura, pH, oxigênio dissolvido (OD) e o índice volumétrico do lodo (IVL₃₀).

Os resultados deste período estão apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 - Dados do monitoramento do sistema na segunda dosagem (50mg/L)

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx	coef var
Temperatura (°C)	Tanque de	30	18 ± 2	18	14	23	13%
pH		28	7,1 ± 0,1	7,0	7,0	7,3	2%
OD (mg/L)	Aeração	28	3,3 ± 1,4	3,1	0,5	6,0	44%
IVL ₃₀ (mL/g)		12	60 ± 21	55	40	103	35%

O valor médio de pH no período foi de 7,1 e de oxigênio dissolvido em torno de 3 mg/L. Esses valores estão dentro do proposto (pH aproximadamente de 7,0 e OD maior que 2,0 mg/L) para o monitoramento do sistema.

Durante este período o valor médio do IVL₃₀ (mL/g) foi de 60 mL/g. Segundo Von Sperling (2002), esse valor encontra-se na faixa da boa sedimentabilidade do lodo (valor de IVL entre 50 a 100 mL/g).

Comparando os valores do índice volumétrico do lodo obtidos ao longo das etapas da pesquisa, observa-se que esse índice vem decrescendo. O valor de IVL₃₀ diminuiu de 130 (na fase sem adição de lodo de ETA) para 87 mL/g (com adição de 25 mg/L de lodo de ETA) e deste para os atuais 60 mL/g. Tal fato pode indicar uma melhora na sedimentabilidade do lodo.

A relação A/M no período foi de 0,17 kg DBO/kg SSVTA.dia, próximo a faixa esperada para sistemas de aeração prolongada.

Durante esta etapa da pesquisa não houve qualquer alteração no controle operacional do sistema, como na idade do lodo.

5.3.3. Resultados de DBO_{5,20} e DQO

A Tabela 37 apresenta os valores da concentração de DBO_{5,20} e de DQO no afluente e no efluente referente ao período com o lançamento da segunda dosagem de lodo de ETA (50 mg/L) no sistema.

Tabela 37 - Resultados de DBO_{5,20} e DQO para a segunda dosagem (50 mg/L)

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx
DBO _{5,20} total (mg/L)	Afluente	5	286 ± 61	267	224	386
DBO _{5,20} total (mg/L)	Efluente	4	14 ± 11	10	6	30
DQO total (mg/L)	Afluente	14	379 ± 114	377	185	600
DQO total (mg/L)	Efluente	14	42 ± 11	42	26	63
DQO filtrado (mg/L)	Efluente	14	26 ± 8	25	18	51
Remoção de DBO (%)	Efic (%)	4	95,1 ± 4,2	96,7	88,8	98,1
Remoção de DQO (%)	Efic (%)	13	87,7 ± 6,4	90,1	74,7	93,2

Os resultados mostram que o sistema apresentou estabilidade na remoção da matéria orgânica. Durante este período o efluente apresentou concentrações médias de DBO_{5,20} de 14 mg/L e de DQO de 42 mg/L.

Os valores das concentrações médias de DQO no efluente total de 42 mg/L e no efluente filtrado de 26 mg/L mostram não houve problemas com arraste de sólidos pelo efluente final.

As eficiências médias de remoção de DBO_{5,20} foram de 95,1% e de DQO de 87,7%

Os valores das médias e medianas estão próximos, não havendo distorções nos resultados por eventuais valores atípicos.

A Figura 43 apresenta as séries temporais dos valores de DBO_{5,20} e da eficiência de remoção. Aproximadamente entre 80º e 120º dia houve um período sem resultados, isso devido à falta de esgoto e problemas ocorridos ao sistema. As concentrações de DBO_{5,20} no esgoto bruto variaram de 127 mg/L (valor mínimo) a 362 mg/L (máximo) e no efluente final as concentrações variaram de 9 mg/L (mínimo) a 40 mg/L (máximo). As eficiências de remoção variaram de 84,3% (máximo) a 97,5% (máximo).

Figura 43 - Séries temporais de: (a) concentração de $\text{DBO}_{5,20}$ no afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

Os diagramas *box plot* da concentração de $\text{DBO}_{5,20}$ do afluente e efluente e a eficiência de remoção estão ilustrados na Figura 44 e apresentam a variabilidade dos resultados.

A maior variabilidade no dados de $\text{DBO}_{5,20}$ ocorreu no esgoto bruto com intervalo interquartil de aproximadamente 40 mg/L (Figura 44a). O efluente apresentou intervalo interquartil de 8 mg/L (Figura 44b).

A eficiência de remoção apresentou amplitude interquartílica de 3% (Figura 44c).

Figura 44 - Diagrama *box plot* de: (a) concentração de $\text{DBO}_{5,20}$ no afluyente e efluente, (b) concentração de $\text{DBO}_{5,20}$ no efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA e (c) eficiência de remoção associada

A Figura 45 apresenta os gráficos das séries temporais para a concentração de DQO afluyente e efluente e para a eficiência de remoção. As concentrações de

DQO no esgoto bruto variaram de 185 mg/L (valor mínimo) a 600 mg/L (valor máximo), mas o efluente permaneceu com concentração de DQO próximo de 50 mg/L (Figura 45a). As eficiências de remoção variaram de 74,7% (mínimo) a 93,2% (máximo).

Figura 45 - Séries temporais de: (a) concentração de DQO afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

A Figura 46 apresenta os diagramas *box plot* para o parâmetro DQO. A maior variabilidade na concentração de DQO no esgoto bruto (intervalo interquartil de 120 mg/L) e a pequena dispersão no efluente total (intervalo de 9 mg/L) pode ser observada, respectivamente, nas Figuras 46a e 46b. A eficiência de remoção apresentou intervalo interquartil de 9% (Figura 46c).

Figura 46 - Diagrama *box plot* de: (a) concentração de DQO no afluyente e efluente, (b) concentração de DQO no efluente total e filtrado ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA e (c) eficiência de remoção associada

5.3.4. Resultados de pH e alcalinidade

A Tabela 38 apresenta os resultados de pH e alcalinidade para o esgoto bruto e efluente final. O esgoto bruto apresentou valor médio de pH igual a 7,0 e alcalinidade média de 270 mg/L. O efluente final apresentou pH médio de 7,0 e alcalinidade média de 128 mg/L.

A condição neutra no reator aeróbio foi mantida ao longo deste período pela dosagem automática do alcalinizante.

Tabela 38 - Resultados de pH e alcalinidade para a segunda dosagem (50 mg/L)

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx	coef var
pH	Afluente	14	7,1 ± 0,3	7,1	6,6	7,7	5%
pH	Efluente	14	7,0 ± 0,2	7,0	6,7	7,3	3%
Alcalinidade (mg/L)	Afluente	14	270 ± 68	251	181	418	25%
Alcalinidade (mg/L)	Efluente	14	128 ± 41	130	58	219	32%

5.3.5. Resultados de concentração de sólidos

A Tabela 38 apresenta os resultados em relação aos sólidos em suspensão do sistema.

Tabela 39 - Resultados de sólidos em suspensão para a segunda dosagem (50mg/L)

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx
SST (mg/L)	Afluente	14	119 ± 38	119	62	222
SST (mg/L)	Efluente	14	23 ± 11	21	5	48
SST (mg/L)	Tanque de aeração	14	3.109 ± 639	3.378	2.096	3.836
SSV (mg/L)	Afluente	12	103 ± 36	94	62	198
SSV (mg/L)	Efluente	12	15 ± 10	14	0	37
SSV (mg/L)	Tanque de aeração	12	2.196 ± 549	2.402	1.372	2.716
SSF (mg/L)	Afluente	12	15 ± 7	16	0	24
SSF (mg/L)	Efluente	12	7 ± 10	4	0	36
SSF (mg/L)	Tanque de aeração	12	942 ± 155	895	724	1.144
SSV/SST	Tanque de aeração	12	0,69 ± 0,04	0,71	0,62	0,77
Remoção SS (%)	Efic (%)	14	78,8 ± 12,7	82,4	52,0	95,7

O sistema apresentou estabilidade na remoção de sólidos em suspensão. O efluente final apresentou valor médio da concentração de sólidos em suspensão de 23 mg/L e eficiência média de remoção associada de 78,8%.

A concentração média de sólidos em suspensão totais no lodo do tanque de aeração foi de 3.109 mg/L. Houve aumento na concentração de sólidos em suspensão do lodo do tanque de aeração em relação à fase anterior (primeira dosagem de lodo de ETA) que apresentou valor médio de 2.362 mg/L. Tal fato ocorreu certamente pela introdução de 50 mg/L do lodo de ETA durante esta etapa.

A relação SSV/SST do lodo do tanque de aeração (Tabela 38) diminuiu em relação ao período anterior (SSV/SST igual a 0,76), como era esperado, devido à contribuição do lodo da ETA que praticamente é constituído de compostos inorgânicos (73% de SSF).

Com relação ao lodo de retorno, a concentração média de SS permaneceu cerca do dobro da concentração de SS do lodo do tanque de aeração (Tabela 40).

Tabela 40 - Resultados de SS, SSV, SSF do lodo de retorno para a segunda dosagem

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx
SSV/SST	Linha retorno	10	0,68 ± 0,04	0,70	0,62	0,72
SS (mg/L)	Linha retorno	12	6.146 ± 2.625	6.312	2.452	10.195
SSV (mg/L)	Linha retorno	10	4.216 ± 2.009	4.396	1.556	7.275
SSF (mg/L)	Linha retorno	10	1.840 ± 714	1.896	896	2.920

A Figura 47 apresenta os gráficos temporais do parâmetro SS do afluente e efluente e a eficiência de remoção associada.

As concentrações de sólidos em suspensão no esgoto variaram de 62 mg/L (valor mínimo) a 222 mg/L (máximo). O efluente manteve concentração de SS menor que 50 mg/L, com mínimo de 5 mg/L e máximo de 48 mg/L (Figura 47a).

Os valores das eficiências de remoção permaneceram entre 52% (valor mínimo) e 95,7% (valor máximo) (Figura 47b).

Figura 47 - Série temporais de: (a) concentração de SS afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

Os diagramas *box plot* das concentrações de sólidos em suspensão do esgoto bruto e efluente final e da eficiência de remoção associada estão ilustrados na Figura 48.

A maior dispersão nos resultados ocorreu na concentração de SS no esgoto bruto com intervalo interquartil de 35mg/L (Figura 48a). O efluente final apresentou menor dispersão com intervalo interquartil de 9 mg/L (Figura 48b).

A eficiência de remoção de sólidos em suspensão do sistema apresentou intervalo interquartil de 18% (Figura 48c).

Figura 48 - Diagrama *box plot* de: (a) concentração de SS afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA e (b) concentração de SS efluente ao sistema e (c) eficiência de remoção associada

Com relação à distribuição de sólidos no lodo biológico, a Figura 49 indica que a fração dissolvida e fixa são as menores parcelas que contribuem para a concentração de sólidos totais.

Pela Figura 49 também se pode analisar a variação na concentração de sólidos em suspensão pela distância interquartil de aproximadamente 1.000 mg/L, o que refletiu conseqüentemente na concentração de sólidos totais (intervalo interquartil de 900 mg/L). Esta dispersão foi ocasionada por períodos de recuperação do sistema após falta de esgoto, contribuindo para as menores concentrações de SS no gráfico, e pela adição de 50 mg/L de lodo de ETA, contribuindo para as maiores concentrações de sólidos no período.

Figura 49 - Diagrama *box plot* das frações dissolvida e em suspensão e também das frações orgânica e inorgânica do lodo biológico com 50 mg/L de lodo de ETA

O comportamento da concentração de sólidos em suspensão do lodo do tanque de aeração influenciou o comportamento da concentração de sólidos em suspensão no lodo de retorno (Figura 50).

Os valores da concentração de sólidos em suspensão totais no lodo de retorno apresentaram grande variação, com intervalo interquartil de aproximadamente 4.300 mg/L. O intervalo interquartil da concentração de sólidos em suspensão voláteis foi de 3.000 mg/L (maior contribuição na concentração de sólidos do lodo) e o intervalo interquartil da concentração de sólidos em suspensão fixos foi de 1.000 mg/L (menor contribuição na concentração de sólidos do lodo) (Figura 50).

Figura 50 - Diagrama *box plot* da fração dissolvida e em suspensão e também da fração orgânica e inorgânica do lodo de retorno com 50 mg/L de lodo de ETA

Durante este período com lançamento de 50 mg/L lodo de ETA ao processo de lodo ativado, não foi verificada nenhuma formação de lodo intumescido ou de espuma no reator biológico do sistema.

5.3.6. Resultados de nitrogênio e fósforo

As Tabelas 41 e 42 apresentam os resultados da série nitrogenada e do fósforo (total e solúvel).

Tabela 41 - Resultados da série nitrogenada e do fósforo (total e solúvel) na segunda dosagem (continua)

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx
N-NTK (mg/L)	Afluente	13	76 ± 14	73	59	96
N-NTK (mg/L)	Efluente	13	3 ± 4	1	0	11
N-NH ₃ (mg/L)	Afluente	14	67 ± 13	64	50	88
N-NH ₃ (mg/L)	Efluente	14	1 ± 1	0	0	5
Nitrato (mg/L)	Efluente	8	40 ± 12	42	23	55
Nitrito (µg/L)	Efluente	10	853 ± 708	804	204	2.621

Tabela 42 - Resultados da série nitrogenada e do fósforo (total e solúvel) na segunda dosagem (conclusão)

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx
Fósforo Total (mg/L)	Afluente	13	9,0 ± 1,6	9,4	6,0	11,1
Fósforo Total (mg/L)	Efluente	13	6,9 ± 1,4	6,5	5,0	9,3
Fósforo Solúvel (mg/L)	Afluente	13	7,3 ± 1,7	7,4	4,9	9,7
Fósforo Solúvel (mg/L)	Efluente	13	5,7 ± 1,2	5,7	4,1	8,6
Remoção NTK (%)	Efic (%)	13	96,3 ± 5,7	98,8	81,0	100
Remoção N-Amoniacal (%)	Efic (%)	14	98,7 ± 2,6	99,8	90,3	100

O processo de nitrificação apresentou-se estável. A concentração média de nitrogênio total Kjeldahl no efluente foi de 3 mg/L e mediana de 1 mg/L. A concentração média de nitrogênio amoniacal no efluente final foi de 1 mg/L e mediana de zero.

Em relação às eficiências, média de remoção de nitrogênio amoniacal de 98,7% e de Nitrogênio total Kjeldahl foi de 96,3%.

As concentrações médias de fósforo total e de fósforo solúvel de no efluente final permaneceram elevadas com valores de 6,8 mg/L e 5,7 mg/L, respectivamente. As eficiências de remoção de fósforo total e solúvel relacionadas a essas concentrações nesse período foram de 23,3% e 21,9%, respectivamente. Houve um aumento na eficiência de remoção fósforo solúvel se comparado aos períodos anteriores (remoção nula para a fase sem adição de lodo de ETA e 9,1% para a fase com adição da primeira dosagem).

A Figura 51 apresenta os gráficos temporais em relação ao parâmetro nitrogênio total Kjeldahl do afluente e efluente e à eficiência de remoção associada.

As concentrações de nitrogênio Kjeldahl no esgoto bruto variaram de 59 mg/L (valor mínimo) a 96 mg/L (valor máximo). As concentrações no efluente permaneceram menores que 10 mg/L, com valor mínimo de zero e máximo de 11 mg/L (Figura 51a).

As eficiências de remoção variaram de 81% (mínimo) a 100% (Figura 51b). Esse valor mínimo de 81% na eficiência corresponde ao maior valor da concentração de nitrogênio Kjeldahl no efluente ocorrido no 134º dia de operação por problemas no sistema de raspagem do lodo no decantador secundário. A partir dessa data o sistema de raspagem de lodo ficou parado para manutenção, o que comprometeu o período posterior da terceira dosagem do lodo de ETA.

Figura 51 - Séries temporais de: (a) concentração de nitrogênio Kjeldahl total afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

A Figura 52 apresenta os gráficos temporais em relação ao parâmetro nitrogênio amoniacal do afluente e efluente e à eficiência de remoção associada.

As concentrações de nitrogênio amoniacal no esgoto bruto variaram de 50 mg/L (valor mínimo) a 88 mg/L (máximo) e as concentrações de nitrogênio amoniacal no efluente variaram de zero (mínimo) a 5 mg/L (máximo) (Figura 52a)

As eficiências de remoção permaneceram acima de 90%, com valor mínimo de 90,3% e máximo de 100% (Figura 52b).

Figura 52 - Séries temporais de: (a) concentração de nitrogênio amoniacal afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

A Figura 53 apresenta o diagrama *box plot* para as concentrações de nitrogênio Kjeldahl e de nitrogênio amoniacal contidas no esgoto bruto e efluente final (Figura 53a) e para a eficiência de remoção associada (Figura 53b).

A maior variabilidade ocorreu na concentração de nitrogênio total Kjeldahl e nitrogênio amoniacal no esgoto bruto, com intervalos interquartis de aproximadamente de 27 mg/L e 18 mg/L, respectivamente.

O mesmo comportamento ocorreu nas concentrações de nitrogênio no efluente final, com intervalo interquartil de 4 mg/L para o nitrogênio Kjeldahl e intervalo interquartil menor que 1 mg/L para o nitrogênio amoniacal.

A variabilidade da eficiência de remoção do nitrogênio Kjeldahl foi maior (intervalo interquartil de 5%) que do nitrogênio amoniacal (intervalo de 1%)

Figura 53 - Diagrama *box plot* de: (a) concentração de nitrogênio NKT e amoniacal afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

A Figura 54 apresenta as séries temporais dos resultados das concentrações de fósforo total no esgoto bruto e efluente final.

Pelo gráfico da Figura 54 observa-se que as concentrações de fósforo total no afluente variaram de aproximadamente 6,0 mg/L (mínimo) a 11,1 mg/L (máximo) e as concentrações no efluente final variaram de 5,0 (mínimo) a 9,3 mg/L (máximo).

Figura 54 - Séries temporais de concentração de fósforo total afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA

A Figura 55 apresenta as séries temporais das concentrações de fósforo solúvel no esgoto bruto e efluente final.

As concentrações de fósforo solúvel no afluente variaram de aproximadamente 4,9 (valor mínimo) a 9,7 mg/L (valor máximo) enquanto que as concentrações no efluente variaram de 4,1 mg/L (mínimo) a 8,6 mg/L (máximo).

Figura 55 - Séries temporais de concentração de fósforo solúvel afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA

Os diagramas *box plot* para as concentrações do fósforo total e solúvel no afluente e efluente ao sistema estão ilustrados na Figura 56.

Figura 56 - Diagrama de *box plot* de concentração de fósforo total e solúvel afluente e efluente ao sistema com 50 mg/L de lodo de ETA

A maior dispersão nos resultados ocorreu na concentração de fósforo solúvel no esgoto com amplitude interquartilica de 3 mg/L.

Tanto a concentração de fósforo total no esgoto como a concentração de fósforo total no efluente apresentaram amplitudes de aproximadamente 2 mg/L. A concentração de fósforo solúvel apresentou a menor variação com amplitude interquartilica de 1mg/L.

5.3.7. Taxa de consumo de oxigênio aparente (TCO_a)

Os valores de oxigênio dissolvido (OD) foram medidos com o auxílio de um oxímetro e um cronômetro e registrados na Tabela 43.

Tabela 43 - Valores de OD em função do tempo obtidos durante o ensaio da determinação da taxa de consumo de oxigênio do lodo com a segunda dosagem (50 mg/L)

Tempo (min)	OD (mg/L)	Tempo (min)	OD (mg/L)	Tempo (min)	OD (mg/L)	Tempo (min)	OD (mg/L)
0,5	6,90	7,5	5,39	14,5	3,81	21,5	2,24
1,0	6,82	8,0	5,28	15,0	3,68	22,0	2,12
1,5	6,73	8,5	5,17	15,5	3,58	22,5	2,01
2,0	6,62	9,0	5,05	16,0	3,47	23,0	1,90
2,5	6,52	9,5	4,94	16,5	3,31	23,5	1,79
3,0	6,42	10,0	4,82	17,0	-	24,0	1,66
3,5	6,30	10,5	4,71	17,5	3,13	24,5	1,56
4,0	6,19	11,2	4,60	18,0	3,01	25,0	1,45
4,5	6,08	11,5	4,47	18,5	2,91	25,5	1,33
5,0	5,97	12,0	4,36	19,0	2,79	26,0	1,20
5,5	5,86	12,5	4,25	19,5	2,68	26,5	1,11
6,0	5,75	13,0	4,14	20,0	2,56	27,0	0,98
6,5	5,61	13,5	4,02	20,5	2,47		
7,0	5,5	14,0	3,92	21,0	2,34		

Esses dados foram utilizados para a construção do gráfico oxigênio dissolvido versus tempo apresentado na Figura 57.

Para obter a melhor reta entre os pontos foi utilizada a análise de regressão linear.

A equação da reta originada foi: $y = -0,2254x + 7,0756$.

A correlação da reta (R^2) aos pontos experimentais foi muito alta, atingindo valor de 99,99%.

A taxa de consumo de oxigênio, determinada pelo coeficiente angular da reta, foi de 0,2254 mg/L.minuto ou 14 mg/L.hora.

Figura 57 - Valores de OD em função do tempo utilizado para determinação da TCO_a no lodo ativado\ com 50 mg SS/L de lodo de ETA

A Tabela 44 apresenta os valores de TCO_a em mg/L.hora e a relaciona com a concentração de SSV presentes no lodo.

Tabela 44 - Resultado da TCO_a no lodo do tanque de aeração, a relação TCO_a/SSV e a concentração de SSV utilizada na segunda dosagem (50 mg/L)

Parâmetros	Lodo do Tanque de Aeração
TCO _a (TCO _a mg/L.h)	14
TCO _a / SSV (mgO ₂ /L.h) / (mgSSV / L _{lodo})	6,44 x 10 ⁻³
SSV (mg/L)	2.196

Comparando os resultados de TCO_a/SSV encontrados nas fases anteriores ($5,95 \times 10^{-3}$ para fase sem adição de lodo de ETA e $6,24 \times 10^{-3}$ para a fase com adição de 25 mg/L de lodo de ETA) com o resultado obtido nesta dosagem (Tabela 44) pode-se dizer que não houve inibição dos microrganismos normalmente presentes no processo de lodo ativado.

5.3.8. Microscopia óptica do lodo

A Figura 58 apresenta o exame microscópico realizado no lodo do tanque de aeração para observar os microrganismos existentes durante o lançamento de 50 mg/L de lodo de ETA ao sistema.

Figura 58 - Exame microscópico do lodo do tanque de aeração com presença de: (a) protozoário pedunculado, (b) anelídeo, (c) rotífero e (d) protozoário ciliado livre

Pelo exame microscópico do lodo observou-se que, aparentemente, não houve alterações perceptíveis na microfauna. Foram verificadas presenças de protozoários ciliados pedunculados e livres, rotíferos e anelídeos, microrganismos encontrados tipicamente em sistemas de aeração prolongada.

Havia sido detectada presença de Mn na concentração de 17 $\mu\text{g/mL}$ na fase líquida do lodo de ETA, porém durante toda este período não se observou nenhuma inibição nos processos biológicos.

5.4. Operação do sistema recebendo a terceira dosagem de lodo de ETA (100 mg/L)

Nesta fase foi adicionado o lodo da ETA de Juitiba de modo a haver acréscimo de sólidos em suspensão de 100 mg/L em relação aos sólidos do esgoto bruto.

O período de estudo foi de aproximadamente 14 dias. Não foi possível dar prosseguimento à pesquisa e completar os 50 dias do período de estudo proposto por problemas na estação piloto e no fornecimento do esgoto utilizado que inviabilizaram a conclusão desta etapa. Apesar disso, esses resultados serão apresentados como uma situação inicial de um sistema de lodo ativado que recebe tal quantidade de lodo gerado em estação de tratamento de água.

Os dados que geraram os resultados estatísticos, que serão discutidos neste capítulo, estão apresentados no Anexo 5.

5.4.1. Caracterização do lodo de ETA adicionado

A Tabela 45 apresenta a caracterização físico-química do lodo de ETA adicionado nesta etapa da pesquisa.

Tabela 45 - Caracterização físico-química do lodo de ETA adicionado na terceira dosagem

Parâmetro	Resultado
DQO total (mg O ₂ /L)	942
SST (mg/L)	4.395
SSF (mg/L)	3.120
SSV (mg/L)	1.275
Fósforo total (mg/L)	5,6
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg/L)	39
SSV/SST	0,27
pH	5,9

A quantidade de sólidos voláteis no lodo de ETA encontra-se dentro da faixa esperada de 20 a 35% dos sólidos totais (ALBRECHT, 1972).

Pelas análises realizadas de metais e elementos-traços constituintes do lodo de ETA nas fases anteriores (Tabelas 22, 33, 34 e 35), estas investigações não foram realizadas novamente.

5.4.2. Variáveis controladas em campo

No monitoramento do sistema os seguintes parâmetros foram analisados: temperatura, pH, oxigênio dissolvido (OD) e índice volumétrico do lodo (IVL₃₀).

Os resultados deste período estão apresentados na Tabela 46.

Tabela 46 - Dados do monitoramento do sistema da terceira dosagem (100 mg/L)

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx	coef var
Temperatura (°C)	Tanque de	5	19 ± 2	19	17	21	8%
pH		5	7,1 ± 0,01	7,1	7,1	7,1	0%
OD (mg/L)	Aeração	5	3,7 ± 0,4	4,0	3,0	4,0	12%
IVL ₃₀ (mL/g)		4	92 ± 8	91	84	104	9%

Os valores médios de pH e OD foram mantidos de acordo com os valores propostos (pH aproximadamente 7,0 e OD maior que 2,0 mg/L) para o monitoramento do sistema.

Durante este período o valor médio do IVL₃₀ (mL/g) foi de 92 mL/g. Comparando-se ao IVL₃₀ dos dois períodos anteriores com adição de lodo de ETA (87mL/g para a primeira dosagem e 60 mL/g para a segunda dosagem) houve um aumento no seu valor, mas ainda encontra-se na faixa da boa sedimentabilidade do lodo (valor de IVL₃₀ entre 50 a 100 mL/g), segundo Von Sperling (2002).

As variações nos parâmetros observadas pelos valores dos coeficientes de variação foram pequenas em razão do curto tempo de estudo (aproximadamente duas semanas).

A relação A/M no sistema ficou em 0,13 kg DBO/ kgSSVTA.dia, dentro da faixa esperada para sistemas de aeração prolongada.

Não houve qualquer alteração no controle operacional do sistema, como na idade do lodo.

5.4.3. Resultados de DBO_{5,20} e DQO

A Tabela 47 apresenta os valores da concentração de DBO_{5,20} e DQO afluente e efluente ao sistema do período com a adição da terceira dosagem de lodo de ETA (100 mg/L).

Tabela 47 - Resultados de DBO_{5,20} e DQO na terceira dosagem (100mg/L)

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx	coef var
DBO _{5,20} (mg O ₂ /L)	Afluente	1	128	-	-	-	-
DBO _{5,20} (mg O ₂ /L)	Efluente	2	12 ± 4	12	9	15	0,37
DQO total (mg O ₂ /L)	Afluente	4	243 ± 37	254	190	273	0,15
DQO total (mg O ₂ /L)	Efluente	4	54 ± 14	56	36	70	0,26
DQO filtrado (mg O ₂ /L)	Efluente	4	30 ± 7	30	22	39	0,24
Remoção de DBO (%)	Efic (%)	2	94,2 ± 1,3	94,2	93,3	95,2	0,01
Remoção de DQO (%)	Efic (%)	4	76,6 ± 9,6	79,2	63,0	85,4	0,12

O sistema apresentou estabilidade na remoção da matéria orgânica. Os resultados mostram que o efluente final apresentou valores médios de DBO_{5,20} de 12 mg/L e DQO de 54 mg/L.

Os valores de DQO no efluente total de 54 mg/L e no efluente filtrado de 30 mg/L mostram que não houve problemas com arraste de sólidos.

Há uma perceptível tendência crescente nas concentrações de DQO no efluente final e uma tendência decrescente na eficiência de remoção com o aumento da adição de lodo de ETA ao sistema, que será discutido particularmente no capítulo seguinte.

A Figura 59 apresenta os gráficos das séries temporais das concentrações de DQO no esgoto bruto e efluente final e da eficiência de remoção associada.

As concentrações de DQO no esgoto bruto variaram de 190 mg/L (mínimo) a 273 mg/L (máximo) e as concentrações de DQO no efluente final variaram de 36 mg/L (valor mínimo) e 70 mg/L (valor máximo).

As eficiências de remoção variaram de 63,0% (mínimo) a 85,4% (máximo).

Figura 59 - Séries temporais de: (a) concentração de DQO no afluente e efluente ao sistema com 100 mg/L de lodo de ETA e (b) a eficiência de remoção associada

Os diagramas *box plot* para a concentração de DQO no esgoto bruto e efluente final (total e filtrado) e para a eficiência de remoção associada estão apresentados na Figura 60.

A maior dispersão nos resultados de concentração de DQO ocorreram no esgoto bruto com intervalo interquartil de aproximadamente 34 mg/L (Figura 60a). O efluente final apresentou intervalo interquartil de 10 mg/L (Figura 60b).

A eficiência de remoção apresentou intervalo de aproximadamente 7% (Figura 60c).

Figura 60 - Diagrama *box plot* de: (a) concentração de DQO no afluente e efluente, (b) concentração de DQO no efluente total e filtrado ao sistema com 100 mg/L de lodo de ETA e (b) a eficiência de remoção associada

5.4.4. Resultados de pH e alcalinidade

A Tabela 48 apresenta os valores de pH e alcalinidade do afluente e do efluente ao sistema. Os valores de pH estão próximos à neutralidade. Neste período o controle da dosagem do alcalinizante também foi automático.

Tabela 48 - Resultados de pH e alcalinidade na terceira dosagem (100mg/L)

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx	coef var
pH	Afluente	4	7,2 ± 0,2	7,2	7,1	7,4	2%
pH	Efluente	4	7,3 ± 0,1	7,3	7,2	7,3	1%
Alcalinidade (mg/L)	Afluente	4	244 ± 13	246	227	258	5%
Alcalinidade (mg/L)	Efluente	4	164 ± 9	165	153	171	5%

5.4.5. Resultados de concentração de sólidos

A Tabela 49 apresenta os resultados em relação à concentração de sólidos em suspensão do sistema.

Tabela 49 - Resultados de sólidos em suspensão (totais, voláteis e fixos) para a terceira dosagem

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx
SST (mg/L)	Afluente	4	72 ± 13	70	58	88
SST (mg/L)	Efluente	4	34 ± 7	34	24	42
SST (mg/L)	Tanque de aeração	4	3.183 ± 250	3.186	2.884	3.476
SSV (mg/L)	Afluente	4	63 ± 15	61	46	82
SSV (mg/L)	Efluente	4	21 ± 10	22	10	30
SSV (mg/L)	Tanque de aeração	4	2.165 ± 182	2.130	1.984	2.416
SSF (mg/L)	Afluente	4	9 ± 3	9	6	12
SSF (mg/L)	Efluente	4	13 ± 8	11	5	24
SSF (mg/L)	Tanque de aeração	4	1.018 ± 93	1.028	900	1.116
SSV/SST	Tanque de aeração	4	0,68 ± 0,02	0,68	0,66	0,70
Remoção SS (%)	Efic (%)	4	52,4 ± 11,7	52,3	41,4	63,6

O efluente final apresentou de concentração de sólidos em suspensão de 34 mg/L, próximo dos valores típicos para o processo de lodos ativados (JORDÃO e PESSOA, 2005).

A concentração média de sólidos em suspensão totais (SST) no lodo foi aproximadamente de 3.183 mg/L. A concentração média de sólidos em suspensão voláteis (SSV) foi de 2.165 mg/L.

A relação SSV/SST do lodo do tanque de aeração nesta fase foi de aproximadamente 0,68.

A eficiência média de remoção de SST do sistema apresentou valor mais baixo do que dos outros períodos, porém pode-se observar que a concentração média de SST no esgoto bruto foi baixa, de aproximadamente de 72 mg/L. Apesar disso, há uma tendência crescente também nas concentrações de sólidos em suspensão totais presentes no efluente final. Quando se comparar o resultado de todas as etapas isso se mostrará mais claro.

Com relação ao lodo de retorno, a concentração média de sólidos em suspensão (5.464 mg/L) permaneceu cerca de pouco abaixo que o dobro da concentração de sólidos em suspensão do lodo do tanque de aeração (3.183 mg/L) e a relação SSV/SST igual a esse (Tabela 50).

Tabela 50 - Resultados de SS, SSV, SSF do lodo de retorno para a terceira dosagem (100 mg/L)

Parâmetro	Ponto	n	média $\pm$ dp	mediana	mín	máx
SSV/SST	Linha retorno	4	0,68 $\pm$ 0,01	0,68	0,67	0,70
SST (mg/L)	Linha retorno	4	5.464 $\pm$ 947	5.769	4.088	6.230
SSV (mg/L)	Linha retorno	4	3.721 $\pm$ 631	3.971	2.796	4.145
SSF (mg/L)	Linha retorno	4	1.743 $\pm$ 330	1.798	1.292	2.085

A Figura 61 apresenta os gráficos temporais para a concentração de sólidos em suspensão no afluente e efluente ao sistema e para a eficiência de remoção associada.

As concentrações de sólidos em suspensão no esgoto bruto variaram de 58 mg/L (valor mínimo) a 88 mg/L (valor máximo) e as concentrações de sólidos em suspensão no efluente final permaneceram menores que 45 mg/L, com valor mínimo de 24 mg/L e valor máximo de 42 mg/L.

As eficiências de remoção variaram de aproximadamente 41,4% (mínimo) a 63,6% (máximo).

Figura 61: Série temporais de: (a) concentração de SS afluente e efluente ao sistema com 100 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

Os diagramas *box plot* para a concentração de sólidos em suspensão no esgoto bruto e no efluente final (total e filtrado) e para a eficiência de remoção associada estão apresentados na Figura 62.

A maior variabilidade ocorreu na concentração de sólidos em suspensão do esgoto bruto com intervalo interquartil de 14 mg/L (Figura 62a). A concentração de SS no efluente apresentou intervalo interquartil de 5 mg/L (Figura 62b).

A eficiência de remoção apresentou intervalo de aproximadamente de 20% (Figura 62c).

Figura 62 - Diagrama *box plot* de: (a) concentração de SS afluente e efluente ao sistema com 100 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

Com relação à distribuição de sólidos no lodo do tanque de aeração, a Figura 63 indica que a fração dissolvida e fixa são as menores parcelas que contribuem para a concentração de sólidos totais.

A maior variabilidade nos resultados ocorreu na concentração de sólidos em suspensão do lodo com intervalo interquartil de aproximadamente 300 mg/L, o que refletiu na variabilidade na concentração de sólidos totais (intervalo de 200 mg/L). A concentração de sólidos totais voláteis apresentou intervalo próximo de 140 mg/L.

As parcelas de menor contribuição, sólidos dissolvidos e sólidos totais fixos, apresentaram intervalos menores que 100 mg/L.

Figura 63 - Diagrama *box plot* da fração dissolvida e em suspensão e também da fração orgânica e inorgânica dos ST do lodo biológico do sistema com 100 mg/L de lodo de ETA

A Figura 64 apresenta o diagrama *box plot* da concentração de sólidos em suspensão no lodo de retorno do sistema. A concentração de sólidos em suspensão totais no lodo de retorno apresentou intervalo interquartil de aproximadamente 700 mg/L. As concentrações de SSV e SSF apresentaram intervalos de 500 mg/L e 200 mg/L, respectivamente.

Figura 64 - Diagrama *box plot* de: (a) concentração de SS no lodo de retorno do sistema com 100 mg/L de lodo de ETA

Durante este período, também não se constatou nenhuma formação de espuma ou de lodo filamentoso devido à adição de 100 mg/L de lodo de ETA.

5.4.6. Resultados de nitrogênio e fósforo

A Tabela 51 apresenta os resultados da série nitrogenada e do fósforo.

Tabela 51 - Resultados da série nitrogenada e do fósforo (total e solúvel) na terceira dosagem (100 mg/L)

Parâmetro	Ponto	n	média ± dp	mediana	mín	máx
NTK (mg/L)	Afluente	4	66 ± 6,0	66	59	73
NTK (mg/L)	Efluente	4	2 ± 2	1	0	4
N-NH ₃ (mg/L)	Afluente	4	59 ± 4	57	55	64
N-NH ₃ (mg/L)	Efluente	4	0 ± 0	0	0	0,4
Nitrato (mg/L)	Efluente	4	46 ± 2	47	44	48
Nitrito (µg/L)	Efluente	4	620 ± 95	628	497	728
Fósforo Total (mg/L)	Afluente	4	6,8 ± 0,2	6,9	6,6	7,0
Fósforo Total (mg/L)	Efluente	4	7,3 ± 1,4	7,2	5,8	8,8
Fósforo Solúvel (mg/L)	Afluente	4	4,1 ± 0,7	3,9	3,6	5,1
Fósforo Solúvel (mg/L)	Efluente	4	4,4 ± 1,4	3,9	3,5	6,5
Remoção NTK (%)	Efic (%)	4	97,4 ± 3,1	97,9	93,9	100,0
Remoção N-NH ₃ (%)	Efic (%)	4	99,8 ± 0,4	100	99,3	100,0

Os resultados mostram que o processo de nitrificação durante este período também não sofreu interferências. O método de análise de nitrogênio amoniacal muitas vezes não detectou este parâmetro no efluente final, o mesmo ocorreu com o nitrogênio total Kjeldahl. As concentrações médias de nitrogênio Kjeldahl e amoniacal no efluente foram de 2 mg/L e zero (não detectado), respectivamente.

Em relação às eficiências médias de remoção, o nitrogênio amoniacal apresentou valor de 99,8% e o nitrogênio total Kjeldahl apresentou valor de 97,4%.

A concentração média de nitrato foi de 46 mg/L, com valor máximo de 48 mg/L e mínimo de 44 mg/L. O nitrito permaneceu com baixa concentração média de 620 µg/L.

A concentração média de fósforo total e solúvel continuaram elevadas com valores de 7,3 mg/L e 4,4 mg/L, respectivamente.

Os gráficos temporais em relação à concentração de nitrogênio total Kjeldahl presente no afluente e efluente e à eficiência de remoção associada estão apresentadas na Figura 65. As concentrações de nitrogênio Kjeldahl no esgoto bruto variaram de 59 mg/L (mínimo) a 73 mg/L (máximo) e as concentrações no efluente variaram de zero (mínimo) a 4 mg/L (máximo) (Figura 65a).

Figura 65 - Séries temporais de: (a) concentração de Nitrogênio Total Kjeldahl afluente e efluente ao sistema com 100 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

As eficiências de remoção permaneceram maiores que 90%, com mínimo de 93,9% e máximo de 100% (Figura 65b).

A Figura 66 apresenta os gráficos temporais em relação ao parâmetro nitrogênio amoniacal presente no afluente e efluente e à eficiência de remoção associada.

Figura 66 - Séries temporais de: (a) concentração de nitrogênio amoniacal afluente e efluente ao sistema com 100 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

As concentrações de nitrogênio amoniacal praticamente não foram detectadas no efluente final. E, portanto, apresentaram eficiência de remoção de aproximadamente 100%.

Os diagramas *box plot* para a concentração de nitrogênio Kjeldahl e amoniacal presentes no esgoto bruto e efluente final e a eficiência de remoção associada estão apresentados na Figura 67.

A maior variabilidade ocorreu na concentração de nitrogênio total Kjeldahl do esgoto bruto com intervalo interquartil de 5 mg/L. A concentração de nitrogênio amoniacal no esgoto bruto apresentou intervalo de 2 mg/L. Os intervalos interquartis para o nitrogênio Kjeldahl e amoniacal do efluente tratado foram de 3 mg/L e zero (não houve variação), respectivamente.

Figura 67 - Diagrama de *box plot* de: (a) concentração de nitrogênio NKT e amoniacal afluente e efluente ao sistema com 100 mg/L de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

A Figura 68 apresenta os resultados da concentração de fósforo total presentes no esgoto bruto e efluente final do sistema.

As concentrações de fósforo total no afluente foram de aproximadamente 7 mg/L e no efluente de 5,8 e 6,5 mg/L.

Figura 68 - Séries temporais de concentração de fósforo total afluente e efluente ao sistema com 100 mg/L de lodo de ETA

A Figura 69 apresenta os resultados de concentração de fósforo solúvel (ortofosfatos) presentes no esgoto bruto e efluente final.

As concentrações de fósforo solúvel no esgoto bruto variaram de 3,6 mg/L a 5,1 mg/L e as concentrações no efluente final variaram de 3,5 mg/L a 6,5 mg/L.

Figura 69 - Séries temporais de concentração de fósforo solúvel afluente e efluente ao sistema com 100 mg/L de lodo de ETA

O teste de taxa de consumo de oxigênio aparente (TCO_a) e o exame microscópico não foram realizados, infelizmente, pois a pesquisa foi interrompida antes da sua conclusão como havia sido planejada. Mas, ao que tudo indica, os microrganismos estavam totalmente adaptados ao lodo de ETA adicionado no sistema. As bactérias mais sensíveis a um possível efeito tóxico seriam as nitrificantes e, pelos resultados obtidos, o processo de nitrificação não foi afetado neste período.

5.5. Estudos comparativos

Nesta seção serão comparados os principais resultados do período sem lançamento e com lançamento de 25 mg/L e 50 mg/L de lodo de ETA em relação à remoção de matéria orgânica, sedimentabilidade do lodo, nitrificação e remoção de fósforo utilizando diagrama de *box plot*. A dosagem de 100 mg/L de lodo de ETA não será incluída por não ter atingido o período de estudo proposto de 50 dias pelos problemas operacionais enfrentados durante esse período impossibilitando a conclusão dessa etapa.

5.5.1. Efeitos sobre a remoção da matéria orgânica

Primeiro serão apresentados os efeitos sobre a remoção da matéria orgânica em termos de $DBO_{5,20}$.

A Figura 70 apresenta o diagrama *box plot* da concentração de $DBO_{5,20}$ no efluente final (Figura 70a) e da eficiência de remoção associada (Figura 70b) para todos os períodos da pesquisa.

Os valores medianos da concentração de $DBO_{5,20}$ no efluente final foram menores após a aplicação de lodo de ETA ao sistema. Antes da adição de lodo de ETA a concentração mediana de $DBO_{5,20}$ era de aproximadamente 19 mg/L e após a adição de lodo de ETA o valor da mediana permaneceu próxima de 10 mg/L.

Os valores medianos das eficiências de remoção aumentaram após o lançamento do lodo de ETA. A eficiência mediana de remoção para a fase sem adição foi de aproximadamente 88%. Após a adição de lodo de ETA, as eficiências mantiveram-se maiores que 94%.

O que se observa também com relação a este parâmetro é que o período com maior dispersão nos valores tanto das concentrações de $DBO_{5,20}$ como das eficiências de remoção ocorreu durante a segunda dosagem (50 mg/L) com intervalo interquartil de aproximadamente 8 mg/L (os demais períodos apresentaram intervalo de 3 mg/L) e de 3% (os demais períodos apresentaram intervalo entre 1% e 2%), respectivamente. Possivelmente, o longo período sem esgoto e outros problemas

que ocorreram com os equipamentos da unidade piloto durante esta fase foram os fatores que contribuíram para este resultado.

De modo geral, pode-se dizer que o sistema em todos os períodos apresentou estabilidade na remoção da matéria orgânica em termos de $\text{DBO}_{5,20}$.

Figura 70 - Diagrama *box-plot* de: (a) DBO do efluente com as diferentes dosagens de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

Os efeitos sobre a remoção de matéria orgânica em termos de DQO podem ser observados pela Figura 71.

A Figura 71a apresenta as concentrações de DQO no efluente total, a Figura 71b as concentrações de DQO no efluente filtrado e a Figura 71c os resultados da eficiência de remoção de DQO total para todos os períodos.

Figura 71 - Diagrama *box-plot* para: (a) DQO do efluente total, (b) DQO do efluente filtrado com as diferentes dosagens de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

Ao contrário do comportamento apresentado pela $DBO_{5,20}$, a concentração mediana de DQO no efluente (total) foi aumentando com o aumento da dosagem de lodo de ETA (Figura 71a). No período sem adição de lodo de ETA a concentração mediana de DQO no efluente era de aproximadamente 31 mg/L, com o lançamento de lodo de ETA esse valor aumentou para 35 mg/L (primeira dosagem de 25 mg/L) e 42 mg/L (segunda dosagem de 50 mg/L).

Com relação à variabilidade dos resultados, foi observado maior dispersão da concentração de DQO no efluente total no período sem adição de lodo de ETA com intervalo interquartil de 21 mg/L, os demais períodos apresentaram intervalos próximos de 10 mg/L.

No caso do efluente filtrado (Figura 71b) a concentração mediana de DQO antes do lançamento do lodo de ETA foi de 17 mg/L, com o lançamento de lodo de ETA esse valor aumentou para 24 mg/L (1ª dosagem) e 25 mg/L (2ª dosagem). A concentração de DQO no efluente filtrado do período sem adição do lodo de ETA também apresentou maior variabilidade com intervalo interquartil de 11 mg/L, para os demais períodos o intervalo variaram de 9 e 6 mg/L.

A eficiência de remoção total apresentou mediana próxima de 90% em todos os períodos. A maior dispersão nos resultados de eficiência de remoção ocorreu no período da segunda dosagem (50 mg/L) com intervalo interquartil de 9%, os demais períodos apresentaram intervalo entre 3% e 7%. Isso possivelmente se deve aos problemas com o esgoto bruto durante essa fase.

Somente com esse resultado de que o acréscimo de lodo de ETA aumentou a concentração de DQO no efluente final poderia se gerar uma expectativa de que a esta prática estaria afetando negativamente os processos biológicos de oxidação da matéria orgânica. Porém, pelos resultados de $DBO_{5,20}$ discutidos acima, da taxa de consumo de oxigênio aparente que apresentou-se próxima em todos os períodos (Tabela 52) e dos exames microscópicos realizados no lodo biológico (Figuras 27, 42 e 58) não foi observada qualquer alteração negativa ao sistema negativa.

Tabela 52 - Valores da relação TCOa/SSV no lodo do tanque de aeração

Condições	Parâmetros	Lodo do Tanque de Aeração
Sem lodo de ETA	$TCO_a / SSV \text{ (mgO}_2\text{/L.h)} / \text{(mgSSV / L}_{lodo})$	$5,95 \times 10^{-3}$
25 mg/L	$TCO_a / SSV \text{ (mgO}_2\text{/L.h)} / \text{(mgSSV / L}_{lodo})$	$6,24 \times 10^{-3}$
50 mg/L	$TCO_a / SSV \text{ (mgO}_2\text{/L.h)} / \text{(mgSSV / L}_{lodo})$	$6,44 \times 10^{-3}$

Então, esse aumento nos valores da concentração de DQO no efluente final poderia ser atribuído a uma contribuição da concentração de DQO do próprio lodo de ETA adicionado ao sistema e não a um possível efeito tóxico sobre os microrganismos depuradores.

Para saber quanto o lodo de ETA poderia contribuir em termos de concentração de DQO foi calculado o valor médio de mgDQO/mgSS do lodo de ETA. Os valores das concentrações de DQO e sólidos em suspensão no lodo de ETA adicionado na pesquisa estão nas Tabelas 20, 21, 32 e 45. A contribuição média calculada foi de 0,29 mg DQO/mgSS.

Então, as dosagens de lodo de ETA contribuiriam teoricamente com uma concentração de DQO de aproximadamente: 7 mg/L na primeira dosagem (25 mg/L de lodo de ETA) e 15 mg/L na segunda dosagem (50 mg/L).

Os acréscimos reais obtidos na análise de DQO do efluente foram de: 6 mg/L, e 7 mg/L.

Somente o acréscimo da primeira dosagem de lodo de ETA teve aumento próximo ao calculado, porém foi o período que apresentou menos problemas operacionais, sem interrupções na pesquisa por falta de esgoto ou quebra de equipamentos.

5.5.2. Efeitos sobre a sedimentabilidade do lodo biológico

A Figura 72 apresenta o diagrama *box plot* do índice volumétrico do lodo e 30 minutos (IVL₃₀).

Com a adição de lodo de ETA ao sistema piloto de lodo ativado, houve uma possível melhora na sedimentabilidade do lodo biológico verificada pelo decréscimo dos valores medianos do índice volumétrico do lodo (Figura 72). Na fase sem adição de lodo de ETA apresentou valor mediano de 107 mL/g, com a adição de 25 mg/L

apresentou mediana de 86 mL/g e com adição de 50 mg/L apresentou mediana de 55 mL/g.

O que também se observa no valor de IVL_{30} é que após a adição de lodo de ETA ao sistema houve uma redução na dispersão dos dados. O intervalo interquartil para o IVL_{30} da fase sem adição de lodo de ETA foi de próximo de 70 mL/g, enquanto para os demais períodos os intervalos foram menores que 30 mL/g.

Figura 72 - Diagrama *box-plot* para IVL_{30} do lodo com as diferentes dosagens de lodo de ETA

O índice volumétrico do lodo medido em 30 minutos (IVL_{30}) é uma medida bastante simplificada e que sofre várias interferências, podendo produzir falsos valores. Resultados mais precisos seriam obtidos com índice volumétrico de lodo diluído (IVLD), índice volumétrico do lodo agitado (IVLA) ou com índice volumétrico de lodo a concentração constante (VAN HAANDEL e MARAIS, 1999; JORDÃO, e PESSOA, 2005). Contudo, pode-se verificar que os volumes de lodo lidos na proveta (Figura 73) apresentam resultados medianos muito próximos (mediana de 200 mL/L) enquanto que a concentração de sólidos em suspensão foi aumentando a cada etapa (Figura 74).

Na Figura 73, as maiores variações nos resultados do volume ocupado pelo lodo na proveta de 1.000 mL foram durante o período sem lançamento de lodo de ETA ao sistema com intervalo interquartil de 150 mL/L e com o lançamento de 50 mg/L do lodo de ETA, com intervalo de 140 mL/L.

Figura 73 - Diagrama *box-plot* para o volume ocupado pelo lodo na proveta (mL/L) com as diferentes dosagens de lodo de ETA

A Figura 74 apresenta as concentrações de sólidos em suspensão no lodo do tanque de aeração. Os valores medianos da concentração de SS aumentaram significativamente com a adição de 50 mg/L de lodo de ETA, com acréscimo de 47,9%. E as variações foram maiores durante o recebimento de 25 mg/L que apresentou intervalo interquartil próximo de 900 mg/L e de 50 mg/L de lodo de ETA com intervalo próximo de 1.000 mg/L.

Figura 74 - Diagrama *box-plot* das concentrações de SS no lodo do tanque de aeração com as diferentes dosagens de lodo de ETA

Esse aumento na concentração de sólidos no tanque de aeração exerce impacto direto na carga de sólidos aplicados no decantador secundário, aumentando a taxa de aplicação de sólidos (TAS). Desde que a TAS não ultrapasse o fluxo limite (fluxo máximo que pode ser transportado para o fundo do decantador) não haverá problemas com a perda de sólidos pelo efluente final, mas é preciso que o decantador esteja trabalhando com folga (fluxo aplicado menor que o limite). Na unidade piloto, o decantador secundário estava operando com folga (TAS menor que $1 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$) e, portanto, não houve problemas com esse acréscimo de sólidos ao sistema.

Com relação ao lodo de retorno do sistema, a Figura 75 apresenta o diagrama *box plot* deste parâmetro para as diversas fases da pesquisa e o que se observa é que também houve aumento na concentração de sólidos em suspensão no lodo de retorno, com a maior variação dos dados na fase em que se adicionou 50 mg/L de lodo de ETA (intervalo interquartil próximo de 4.300 mg/L), porém esse resultado se deve os problemas operacionais enfrentados no período como explicado no item 5.3.5.

Figura 75 - Diagrama *box-plot* das concentrações de SS no lodo de retorno do sistema com as diferentes dosagens de lodo de ETA

Apesar dessa aparente melhora na sedimentabilidade do lodo comentado anteriormente, a Figura 76 mostra que a concentração de sólidos em suspensão totais no efluente final foi aumentando a cada aumento da dosagem de lodo de ETA

e, portanto, a qualidade do efluente final foi diminuindo com o acréscimo de lodo de ETA.

Os valores medianos da concentração de sólidos em suspensão no efluente final foram aumentando: 12 mg/L (sem adição de lodo de ETA), 17 mg/L (com adição de 25 mg/L) e 21 mg/L (com adição de 50 mg/L).

E os valores medianos da eficiência de remoção foram diminuindo: 89,8% (sem adição de lodo de ETA), 85,8% (com adição de 25 mg/L) e 82,4% (com adição de 50 mg/L).

Figura 76 - Diagrama *box-plot* de: (a) SS do efluente ao sistema com as diferentes dosagens de lodo de ETA e (b) eficiência de remoção associada

Em termos de variabilidade dos resultados, o período que apresentou maior dispersão nos resultados foi novamente o período com dosagem de 50 mg/L com intervalo interquartil de 9 mg/L. Os demais períodos apresentaram intervalo entre 5 e 6 mg/L. Nas eficiências, os intervalos interquartis para a fase sem lodo de ETA e com a primeira dosagem foram de 11%. Na fase com 50 mg/L o intervalo foi de 18%.

Esse aumento não ocorreu somente em relação aos sólidos em suspensão como para os sólidos dissolvidos (Figura 77a) e, conseqüentemente, nos sólidos totais (Figura 77b).

Figura 77 - Diagrama *box-plot* de: (a) sólidos totais e (b) sólidos dissolvidos do efluente ao sistema com as diferentes dosagens de lodo de ETA

Antes do lançamento de lodo de ETA, o sistema piloto apresentou no efluente final concentração de sólidos em suspensão baixa com valor mediano de 12 mg/L, e

seria muito difícil que este efluente obtivesse valores ainda mais baixos desses sólidos após o recebimento do lodo de ETA. Mesmo assim, a máxima concentração de SS na última dosagem de 21 mg/L pode ser considerada boa ou próxima dos padrões encontrados para o processo de lodo ativado (JORDÃO e PESSOA, 2005).

A relação SSV/SST do lodo do tanque de aeração foi diminuindo com o aumento da dosagem de lodo de ETA ao sistema e esse mesmo comportamento foi observado também para a relação SSV/SST no efluente final (Figura 78).

Figura 78 - Diagrama *box-plot* de: (a) relação SSV/SST do lodo do tanque de aeração (b) relação SSV/SST no efluente final com as diferentes dosagens de lodo de ETA

Pelo decréscimo dos valores da relação SSV/SST no efluente pode-se dizer que o lodo de ETA contribuiu para o aumento na concentração dos sólidos em suspensão do efluente final

Além disso, verificou-se também que em nenhum momento houve formação de espuma ou lodo filamentosos durante a pesquisa, tanto na fase de operação do sistema sem adição de lodo de ETA como para as demais fases com o lançamento de lodo de ETA.

5.5.3. Efeitos sobre a nitrificação

Para o processo de nitrificação não se observou nenhum efeito deletério. Praticamente todo o nitrogênio introduzido no sistema foi oxidado a nitrato.

A Figura 79 apresenta os diagramas *box plot* para a concentração de nitrogênio Kjeldahl e a eficiência de remoção para os períodos com dosagem de 25 e 50 mg/L.

Figura 79 - Diagrama *box-plot* de: (a) nitrogênio Kjeldahl Total efluente ao sistema e (b) eficiência de remoção com as diferentes dosagens de lodo de ETA

A concentração mediana de nitrogênio total Kjeldahl no efluente final foi menor que 2 mg/L e a eficiência mediana de remoção sempre acima de 95% em todos os períodos.

A maior variabilidade na concentração de nitrogênio Kjeldahl ocorreu na fase com a segunda dosagem (50mg/L) com intervalo interquartil de 4 mg/L, possivelmente devido aos problemas enfrentados nesse período. Nas eficiências, os intervalos interquartis apresentaram-se próximas, de 6% para a primeira dosagem e de 5% para a segunda dosagem.

A Figura 80 apresenta o diagrama *box plot* para a concentração de nitrogênio amoniacal e a eficiência de sua remoção.

Figura 80 - Diagrama *box-plot* para : (a) nitrogênio amoniacal efluente ao sistema e (b) eficiência de remoção com as diferentes dosagens de lodo de ETA

As concentrações medianas estiveram sempre no valor zero (não detectado) em todos os períodos e com intervalos interquartis menores que 1 mg/L.

As eficiências medianas de remoção apresentaram valores de 100%. O maior intervalo interquartil foi da fase sem adição do lodo de ETA com valor de 2%.

Segundo Metcalf e Eddy (2003), as bactérias autotróficas são organismos mais sensíveis à presença de elementos tóxicos e, portanto, boas indicadoras da presença destes. Como neste caso, o processo de nitrificação praticamente não sofreu alterações com a adição de lodo de ETA ao sistema, então, é possível afirmar que o lodo de ETA aplicado ao sistema não exerceu efeito tóxico ou causou alguma condição adversa que promovesse interferência negativa a esses microrganismos.

5.5.4. Efeitos sobre a remoção de fósforo

A Figura 81 apresenta as distribuições de concentração de fósforo total no efluente final em cada etapa.

As concentrações de fósforo total no efluente final após o lançamento do lodo de ETA continuaram com valores medianos próximos ou maiores que a fase sem adição do lodo de ETA. As concentrações medianas de fósforo total nos períodos foram: 5,4 mg/L (fase sem adição de lodo de ETA), 5,4 mg/L (fase com adição de 25 mg/L) e 6,5 mg/L (com adição de 50 mg/L).

Figura 81 - Diagrama *box-plot* para fósforo total do efluente ao sistema com as diferentes dosagens de lodo de ETA

A variabilidade nas concentrações de fósforo total foi maior na dosagem de 50 mg/L de lodo de ETA com intervalo interquartil de 2 mg/L. As demais períodos apresentaram intervalo de 1 mg/L.

Não se observou remoção de fósforo total do sistema atribuída à adição do lodo de ETA. As eficiências de remoção calculadas a partir das concentrações médias afluentes e efluentes ao sistema indicaram os seguintes valores: 25,4% para a fase sem adição de lodo de ETA, 25,7% para a fase com a primeira dosagem e 23,3% para a fase com a segunda dosagem de lodo de ETA.

A Figura 82 apresenta o diagrama *box plot* para a concentração de fósforo solúvel. Os valores medianos das concentrações de fósforo solúvel no efluente final permaneceram aproximadamente entre 5 e 6 mg/L. As concentrações de fósforo solúvel no efluente final apresentaram variabilidades próximas de 1 mg/L.

Avaliando as eficiências de remoção de fósforo de cada período a partir das concentrações médias do esgoto bruto e efluente final tratado observou-se um aumento no valor dessa eficiência com adição de 25 mg/L (9,1%) e 50 mg/L (mediana de 21,9%) do lodo de ETA, porém as concentrações de fósforo solúvel permaneceram elevadas (entre 5 e 6 mg/L).

Figura 82 - Diagrama *box-plot* de fósforo solúvel efluente ao sistema com as diferentes dosagens de lodo de ETA

A adição de lodo de ETA ao sistema pode ter contribuído para o aumento da remoção de fósforo solúvel, pois no período em que o sistema operava sem esse

incremento, a eficiência de remoção foi praticamente nula. Porém, esses resultados foram menores se comparado aos obtidos por outras pesquisas, como de Galarneau e Gehr (1997) que com dosagem de hidróxido de alumínio de 2,61 mg Al/ mg P obtiveram remoções de fósforo solúvel de até 70% e de Chao (2006) que obteve remoções de até 100% em efluente de processo de lodo ativado convencional com aplicação de 37 mg/L de lodo de ETA a base de alumínio.

O que se pode dizer é que alguns fatores nesta pesquisa podem ter contribuído para a obtenção desses resultados, como:

- 1) Não há mistura suficiente para promover o contato necessário: há somente agitação através do sistema de aeração.

A maioria das pesquisas de remoção de fósforo pelo lodo de ETA são feitas por testes em bateladas como o ensaio de *Jar Test*, controlando-se o tempo de mistura e o gradiente de agitação, entre outros parâmetros (CHAO, 2006; GALARNEAU e GEHR, 1997; IPPOLITO et al., 2003, entre outros).

- 2) O lodo de ETA utilizado não era “fresco”: devido às questões logísticas o lodo de ETA utilizado era coletado do fundo do decantador em grandes quantidades e armazenado para uso posterior. Diversas pesquisas apontam a influência do tempo de armazenamento do lodo na capacidade de remoção de fósforo, a capacidade de adsorção diminui com o passar do tempo de formação do precipitado (CHAO, 2006; GALARNEAU e GEHR, 1997).

5.5.5. Efeitos sobre a produção de lodo (balanço de massa) no sistema

Dois balanços de massa, um teórico e outro na situação real, foram desenvolvidos para avaliar a produção de lodo no processo de lodo ativado durante o período sem adição de lodo de ETA e nas etapas posteriores com o recebimento do lodo em diferentes dosagens. A terceira dosagem de 100 mg/L também foi incluída tanto no balanço teórico como no real, mas deve ser salientado aqui que esse período de estudo não deve ter alcançado valores estabilizados devido ao curto período de estudo (14 dias), e que os valores de produção de lodo ao final dos 50 dias de estudo proposto possivelmente seriam maiores que os que serão apresentados aqui.

Os dados do sistema utilizados em ambos os balanços estão apresentados na Tabela 53. Valores adotados e as equações utilizadas para os cálculos estão especificados no Anexo 6.

Tabela 53 - Dados do sistema utilizados para o cálculo de produção de sólidos

Dados	SEM LODO ETA	1 ^a DOSAGEM (25 mg/L)	2 ^a DOSAGEM (50 mg/L)	3 ^a DOSAGEM (100 mg/L)
Vazão de esgoto (m ³ /dia)	0,264	0,264	0,264	0,264
Vazão de descarte do lodo em excesso (m ³ /dia)	0,073	0,073	0,073	0,073
DBO média afluyente (mg/L)	206	227	286	217
Carga DBO (g/dia)	54,38	59,93	75,50	57,29
DBO média efluente (mg/L)	21	7	14	12
SST média do esgoto (mg/L)	114	144	119	72
SST média do lodo de ETA (mg/L)	0	25	50	100
SST média do efluente final (mg/L)	14	18	23	34
SSV/SST lodo de ETA	0	0,25	0,27	0,27
SSV/SST do esgoto	0,91	0,83	0,86	0,87
SSV/SST do lodo biológico (real)	0,84	0,76	0,69	0,68

Primeiramente serão apresentados os resultados do cálculo teórico de produção de sólidos.

5.5.3.1. Resultados do balanço de massa para cálculo de produção de lodo teórico

Os cálculos abaixo se referem à produção teórica de sólidos do sistema, levando em consideração a presença de sólidos no afluente.

Inicialmente, calculou-se a produção de sólidos afluente ao reator e depois a produção de sólidos biológicos no reator.

Sólidos afluentes ao reator

Para a composição dos sólidos afluentes ao reator foram considerados os sólidos presentes no esgoto bruto e no lodo de ETA adicionado ao sistema. Os resultados da produção de sólidos do esgoto estão apresentados na Tabela 54.

Tabela 54 - Produção de sólidos (SS) do esgoto para o balanço de massa teórico

Produção SS	SEM LODO ETA	1ª DOSAGEM (25 mg/L)	2ª DOSAGEM (50 mg/L)	3ª DOSAGEM (100 mg/L)
P_x (g/dia)	30,10	38,02	31,42	19,01
P_{xv} (g/dia)	27,39	31,55	27,02	16,54
P_{xvb} (g/dia)	16,43	18,93	16,21	9,92
P_{xnb} (g/dia)	10,95	12,62	10,81	6,61
P_{xi} (g/dia)	2,71	6,46	4,40	2,47

A Tabela 55 apresenta os resultados da produção de sólidos do lodo de ETA. Como a biodegradabilidade do lodo de ETA é baixa, considerou-se a fração biodegradável igual a zero.

Tabela 55 - Produção de sólidos (SS) do lodo de ETA para o balanço de massa teórico

Produção SS	SEM LODO ETA	1ª DOSAGEM (25 mg/L)	2ª DOSAGEM (50 mg/L)	3ª DOSAGEM (100 mg/L)
P_x (g/dia)	0,00	6,60	13,20	26,40
P_{xv} (g/dia)	0,00	1,65	3,56	7,13
P_{xb} (g/dia)	0,00	0,00	0,00	0,00
P_{xnb} (g/dia)	0,00	1,65	3,56	7,13
P_{xi} (g/dia)	0,00	4,95	9,64	19,27

Da soma das contribuições resultou a produção de sólidos total afluyente (Tabela 56).

Tabela 56 - Produção total afluyente de sólidos (SS) ao sistema para o balanço de massa teórico

Produção SS	SEM LODO ETA	1ª DOSAGEM (25 mg/L)	2ª DOSAGEM (50 mg/L)	3ª DOSAGEM (100 mg/L)
P_x (g/dia)	30,10	44,62	44,62	45,41
P_{xv} (g/dia)	27,39	33,20	30,58	23,66
P_{xb} (g/dia)	16,43	18,93	16,21	9,92
P_{xnb} (g/dia)	10,95	14,27	14,37	13,74
P_{xi} (g/dia)	2,71	11,41	14,03	21,74

A seguir foram calculados os sólidos biológicos produzidos no reator.

Sólidos biológicos produzidos no reator

Para o cálculo dos sólidos biológicos produzidos foram adotados alguns valores como, coeficiente de produção celular (Y) igual a 0,5; fração biodegradável ao gerar os sólidos (f_b') igual a 0,8; coeficiente de decaimento celular (k_d) igual a $0,09d^{-1}$.

O coeficiente de produção celular observada (Y_{obs}) e a fração biodegradável dos sólidos submetidos a uma determinada idade do lodo (f_b) foram calculados e as equações utilizadas estão apresentadas no Anexo 6.

Coeficiente de produção celular observada (Y_{obs}):

$$Y_{obs} = 0,22 \text{ g SSV / g DBO}_{removida}$$

Fração biodegradável dos sólidos submetidos a uma determinada idade do lodo (f_b):

$$f_b = 0,55 X_b/X_v$$

Com relação aos sólidos biológicos produzidos no reator, os resultados estão apresentados na Tabela 57.

Tabela 57 - Cálculo de sólidos biológicos produzidos no reator para o balanço de massa teórico

Produção SS	SEM LODO ETA	1a DOSAGEM (25 mg/L)	2a DOSAGEM (50 mg/L)	3a DOSAGEM (100 mg/L)
P_{xv} bruta (g/dia)	24,42	29,04	35,90	27,06
P_x bruta (g/dia)	27,13	32,27	39,89	30,07
P_{xi} (g/dia)	2,71	3,23	3,99	3,01
P_{xv} líquida (g/dia)	10,90	12,96	16,02	12,07
P_{xb} líquida (g/dia)	0,00	0,00	0,00	0,00
$P_{xv\ nb}$ (g/dia)	10,90	12,96	16,02	12,07
P_x líquida (g/dia)	13,61	16,18	20,01	15,08
SSV/SST	0,80	0,80	0,80	0,80

O próximo passo foi o cálculo da produção total de sólidos no sistema.

Produção total de sólidos no sistema

A soma da produção de sólidos afluentes e da produção de sólidos biológicos gerou a produção total de sólidos no sistema (Tabela 58).

Tabela 58 - Produção total de sólidos (afluente + reator) no sistema para o balanço de massa teórico

Produção SS	SEM LODO ETA	1a DOSAGEM (25 mg/L)	2a DOSAGEM (50 mg/L)	3a DOSAGEM (100 mg/L)
P_x (SS) (g/dia)	27,27	41,87	48,41	50,57
P_{xv} (SSV) (g/dia)	21,85	27,23	30,39	25,82
P_{xnb} (SSV _{nb}) (g/dia)	21,85	27,23	30,39	25,82
P_{xb} (SSV _b) (g/dia)	0,00	0,00	0,00	0,00
P_{xi} (SSF) (g/dia)	5,42	14,64	18,02	24,75
SSV/SST	0,80	0,65	0,63	0,51
g SS / g DBO _{removida}	0,56	0,72	0,67	0,93
g DBO _{removida}	48,84	58,08	71,81	54,12

O resumo dos resultados obtidos está apresentado na Tabela 59.

Tabela 59 - Resumo da produção teórica dos sólidos em suspensão (SS) do sistema

Balanco de SS	SEM LODO ETA	1a DOSAGEM (25 mg/L)	2a DOSAGEM (50 mg/L)	3a DOSAGEM (100 mg/L)
SS total produzido (g/dia)	27,27	41,87	48,41	50,57
SSV/SST do SS total produzido	0,80	0,65	0,63	0,51
g SS / g DBO _{removida}	0,56	0,72	0,67	0,93

A produção de sólidos no sistema foi aumentando à medida que foi adicionado maior quantidade de lodo de ETA (41,87 gSS/dia na primeira dosagem, 48,41 gSS/dia na segunda dosagem e 50,57 gSS/dia na terceira dosagem). Com a adição de 25 mg/L de lodo de ETA houve, então, acréscimo na produção dos sólidos de 53,5% com relação ao período sem adição do lodo de ETA, com a adição de 50 mg/L houve acréscimo de 77,5% e com a adição de 100 mg/L houve acréscimo de 85,4% dos sólidos produzidos por dia. Esses aumentos maiores que 50% na produção de lodo exercem impactos diretos nos sistema de tratamento de lodo e nos decantadores secundários e exigem que esses sistemas tenham capacidade para assimilar essas novas cargas (como já comentado no item 5.5.2.)

Pode-se observar também que a relação SSV/SST dos sólidos produzidos foi decrescendo pela contribuição dos sólidos fixos presentes no lodo de ETA.

A seguir são apresentados os resultados do cálculo real da produção de sólidos.

5.5.3.2. Resultados do balanço de massa para cálculo da produção de lodo na situação real

Para o balanço de massa ocorrido efetivamente no sistema foram consideradas as concentrações médias de sólidos em suspensão presentes no esgoto, lodo de ETA, lodo em excesso descartado do sistema e efluente final já apresentadas na Tabela 51.

A Figura 83 apresenta o fluxo de entrada (esgoto bruto e lodo de ETA) e saída (descarte do lodo de excesso e efluente final) e saída de sólidos no sistema para o cálculo do balanço de massa.

Figura 83 - Diagrama esquemático dos fluxos de entrada e saída de sólidos no sistema

Sólidos afluentes ao sistema

Os sólidos afluentes ao reator foram constituídos dos sólidos presentes no esgoto e da adição de lodo de ETA (Tabela 60).

A produção dos sólidos foi calculada multiplicando a vazão de esgoto pela concentração de sólidos.

Tabela 60 - Produção total afluente de sólidos (SS) ao sistema para o balanço de massa real

Produção SS	SEM LODO ETA	1ª DOSAGEM (25 mg/L)	2ª DOSAGEM (50 mg/L)	3ª DOSAGEM (100 mg/L)
P_x do esgoto bruto (g/dia)	30,10	38,02	31,42	19,01
P_x do lodo de ETA (g/dia)	0,00	6,60	13,20	26,40
P_x total afluente (g/dia)	30,10	44,62	44,62	45,41

Sólidos que saem do sistema (Produção total de sólidos)

Neste caso, os sólidos totais produzidos foram considerados aqueles que saem do sistema por duas vias: pelo efluente final e, a mais significativa, pelo descarte de lodo em excesso. Os resultados de produção total de sólidos no sistema estão apresentados na Tabela 61.

Tabela 61 - Produção real total de sólidos (SS) no sistema

Produção SS	SEM LODO ETA	1ª DOSAGEM (25 mg/L)	2ª DOSAGEM (50 mg/L)	3ª DOSAGEM (100 mg/L)
SS do lodo em excesso (g/dia)	16,48	17,24	22,70	23,24
SS do efluente final (g/dia)	3,59	4,62	5,90	8,73
SS total produzidos (g/dia)	20,07	21,86	28,60	31,96
SSV/SST	0,84	0,73	0,69	0,68
Carga de DBO removida (g)	48,84	58,08	71,81	54,12
g SS / g DBO _{removida}	0,41	0,38	0,40	0,59

Pela Tabela 61, pode-se observar o aumento na produção de sólidos no sistema real com a adição de lodo de ETA (17,24 gSS/dia na primeira dosagem, 22,70 gSS/dia na segunda dosagem e 23,24 gSS/dia na terceira dosagem). Os acréscimos na produção de lodo foram de: 4,6% na primeira dosagem, 37,7% na segunda dosagem e 41,0% na terceira dosagem. Os maiores acréscimos na produção de lodo ocorreram nas dosagens de 50 mg/L e 100 mg/L.

Pode-se observar também o decréscimo da relação SSV/SST com o aumento da dosagem do lodo de ETA.

A seguir serão apresentados os resultados comparativos entre os cálculos teóricos e reais de produção de sólidos no sistema.

5.5.3.3. Resultados comparativos entre os balanços de massa para cálculo da produção de lodo teórico e real

Para comparar os resultados obtidos nos dois itens anteriores (5.5.3.1. e 5.5.3.2.) foi montada uma tabela (Tabela 62) com os principais resultados de produção de sólidos teórica e no sistema real.

Tabela 62 - Comparação entre balanço teórico e real dos sólidos em suspensão do sistema

Balanço	SEM LODO ETA		1ª DOSAGEM (25 mg/L)		2ª DOSAGEM (50 mg/L)		3ª DOSAGEM (100 mg/L)	
	Teórico	Real	Teórico	Real	Teórico	Real	Teórico	Real
SS total produzido (g/dia)	27,27	20,07	41,87	21,86	48,41	28,60	50,57	31,96
SSV/SST	0,80	0,84	0,65	0,76	0,63	0,69	0,51	0,68
g SS / g DBO _{removida}	0,56	0,41	0,72	0,38	0,67	0,40	0,93	0,59

Pelos resultados obtidos, observa-se que a tendência de aumento na produção de sólidos do sistema pela adição de lodo de ETA e o decréscimo na relação SSV/SST está presente em ambos os balanços de massa, porém os valores diferem bastante entre si.

O balanço teórico apresentou aumento médio dos sólidos produzidos por dia de: 53,5% com a adição de 25 mg/L de lodo de ETA, de 77,5%, com a adição de 50 mg/L e de 85,4% com a adição de 100 mg/L com relação ao período sem adição.

O balanço real apresentou acréscimo médio na produção de lodo de: 4,6% na primeira dosagem, 37,7% na segunda dosagem e 41,0% na terceira dosagem. Os maiores acréscimos na produção de lodo ocorreram nas dosagens de 50 mg/L e 100 mg/L.

Essa diferença entre os resultados teóricos e reais podem ser atribuída à soma de diferentes fatores, como a adoção de coeficientes e frações de literatura em vez de valores de coeficientes advindos de testes de laboratório nas condições operacionais próximas às esperadas na prática, como sugerido por Von Sperling (2002). Outro importante fator a se levar em consideração é a estimativa do balanço de massa ser realizada sob a hipótese do estado permanente. Esta hipótese é adotada para simplificação dos cálculos e indicada para aplicação em longos períodos de operação do sistema (VON SPERLING, 2002). Entre as etapas estudadas a que apresentou menor diferença entre os valores teórico e real foi à fase de operação do sistema sem adição do lodo de ETA, que durou aproximadamente de 280 dias. As demais fases com a adição de lodo de ETA ao sistema operaram numa escala de curto prazo (aproximadamente 50 dias para a primeira dosagem, 50 dias para a segunda dosagem e 14 dias para a terceira

dosagem) e, como pode ser visto pelos resultados obtidos, a consideração do estado estacionário não foi a melhor condição a ser adotada.

Apesar dessas diferenças entre os valores teóricos e reais, esses resultados indicam a principal consequência do lançamento de lodo de ETA em sistemas de lodo ativado: o aumento na produção de sólidos do sistema e, portanto, aumentando a concentração dos sólidos no tanque de aeração, no decantador secundário e no lodo produzido em excesso.

O decantador secundário desta pesquisa operou com folga, a taxa de aplicação de sólidos era baixa (menor que $1 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$), não ultrapassou a taxa de aplicação de sólidos limite e, portanto, não apresentou problemas de sobrecarga no decantador e perda de lodo pelo efluente final. Mas, em estações de tratamento de esgotos, por exemplo, operando em final de plano (com carga máxima), esse aumento na produção de lodo certamente irá exercer impactos severos na qualidade do efluente final. Portanto, é necessário que a estação de tratamento de esgoto que irá receber o lodo gerado em ETA tenha capacidade operacional nos decantadores secundários e também na linha de tratamento do lodo para receber essa carga de sólidos.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Pelas investigações realizadas concluiu-se que:

1. Não houve interferência sobre os processos biológicos de remoção da matéria orgânica em termos de $DBO_{5,20}$ verificado pelas eficiências de remoção obtidas, pelos resultados pelos testes de TCO_a e pelos exames microscópico do lodo. As eficiências médias de $DBO_{5,20}$ permaneceram acima de 94% após o lançamento do lodo de ETA (96,8% na adição da primeira dosagem, 95,1% na segunda dosagem e 94,2% na terceira dosagem). A TCO_a específica (TCO_a/SSV) manteve valores próximos em todos os períodos ($5,95 \times 10^{-3}$ antes do lançamento, $6,24 \times 10^{-3}$ na adição da primeira dosagem e $6,44 \times 10^{-3}$ na segunda dosagem). O exame microscópico do lodo do tanque de aeração apresentou durante toda a pesquisa presença de microrganismos encontrados tipicamente em sistemas de aeração prolongada como protozoários ciliados pedunculados e livres, rotíferos e anelídeos.
2. Houve uma tendência de aumento da concentração média de DQO no efluente final, porém devido à contribuição da concentração de DQO do lodo de ETA adicionado e não a um possível efeito tóxico exercido ao sistema. O efluente final apresentou concentração média de DQO no efluente final de 32 mg/L antes do lançamento do lodo de ETA, 35 mg/L na adição da primeira dosagem, 42 mg/L na segunda dosagem, 54 mg/L na terceira dosagem de lodo de ETA. E as eficiências de remoção apresentaram decréscimo a cada aumento na dosagem de lodo de ETA (90,1% antes do lançamento, 89,4% na primeira dosagem, 87,7% na segunda dosagem e 76,6% na terceira dosagem).
3. Houve uma tendência na redução do valor médio do IVL_{30} com a introdução de lodo de ETA, apontando uma possível melhora na sedimentabilidade do lodo biológico. Antes do lançamento do lodo de ETA o valor médio do IVL_{30} foi de 130 mL/g, após a adição da primeira dosagem foi de 87 mL/g, na segunda dosagem de 60 mL/g e na terceira dosagem de 92 mL/g. Apesar dessa

aparente melhora na sedimentabilidade do lodo biológico, a concentração de SS no efluente final foi aumentando a cada aumento da dosagem do lodo de ETA e, portanto, diminuindo a qualidade do efluente final. As concentrações médias de SS encontradas no efluente final foram: 14 mg/L na fase sem adição do lodo de ETA, 18 mg/L na fase com a primeira dosagem, 23 mg/L com a segunda dosagem e 35 mg/L com a terceira dosagem.

4. Houve aumento na concentração de SS no lodo do tanque de aeração e na concentração de SS do lodo de retorno e diminuição na relação SSV/SST. As concentrações médias de SS no lodo biológico obtidas foram: 2.257 mg/L para a fase sem adição de lodo de ETA, 2.362 mg/L na fase com a primeira dosagem, 3.109 mg/L na fase com a segunda dosagem e 3.183 mg/L na fase com a terceira dosagem. Os acréscimos na concentração de SS no tanque de aeração com a adição de lodo de ETA foram de: 4,6% na primeira dosagem, 37,7% na segunda dosagem e 41,0% na terceira dosagem. As concentrações médias do lodo de retorno foram: 4.389 mg/L na se sem adição de lodo de ETA, 5.456 mg/L na primeira dosagem, 6.146 mg/L na segunda dosagem e 5.464 mg/L na terceira dosagem. A relação SSV/SST do lodo do tanque de aeração durante a pesquisa foram: 0,84 para a fase sem adição de lodo de ETA, 0,76 na primeira dosagem, 0,69 na segunda dosagem e 0,68 na terceira dosagem. Esse decréscimo na relação SSV/SST era esperado visto que o lodo de ETA é constituído na maior parte de sólidos fixos (73 a 75%).
5. Houve aumento na produção de sólidos (gSS/dia) com a introdução de lodo de ETA: 21,86 g/dia (acrécimo na produção de lodo de 4,6%) na primeira dosagem, 28,60 g/dia (acrécimo de 37,7%) na segunda dosagem e 31,96 g/dia (acrécimo de 41,0%) na terceira dosagem. Os maiores acréscimos na produção de lodo ocorreram na segunda dosagem (50 mg/L) e terceira dosagem (100 mg/L).
6. Não houve interferências no processo de nitrificação após a introdução de lodo de ETA ao sistema. As médias de eficiências de remoção de nitrogênio Kjeldahl e amoniacal permaneceram durante a pesquisa sempre acima de 95%.

7. O lançamento de lodo de ETA ao sistema biológico não contribuiu para a remoção de fósforo total. As eficiências de remoção de fósforo total durante a pesquisa foram de: 25,4% no período sem adição de lodo de ETA, 25,7% no período com a primeira dosagem e 23,3% no período com a segunda dosagem. As concentrações médias de fósforo total no efluente final permaneceram elevadas (5,3 mg/L no período sem adição de lodo de ETA, 5,5 mg/L na primeira dosagem e 6,9 mg/L na segunda dosagem).
8. Houve um aumento na eficiência de remoção do fósforo solúvel após o lançamento de lodo de ETA nas concentrações de 25 mg/L e 50 mg/L com eficiências de 9,1% e 21,9%, respectivamente, porém as concentrações médias também permaneceram elevadas (5,0 mg/L para a primeira dosagem e 5,7 mg/L para a segunda dosagem).

Por esses resultados pode-se dizer que o lançamento de lodo gerado e equalizado de ETAs que utilizem sulfato de alumínio como coagulante e possuam manancial de boa qualidade, em ETEs por processo de lodo ativado com aeração prolongada poderá ser realizada sem que haja prejuízos aos processos biológicos de remoção da matéria orgânica e aos processos de nitrificação. Porém, esta prática poderá trazer aumento na concentração de DQO e na concentração de SS do efluente final pela contribuição da concentração desses parâmetros contidos no próprio lodo de ETA.

Haverá aumento na produção de lodo e, conseqüentemente, na concentração de SS do lodo no tanque de aeração, no lodo de retorno do sistema e na linha de descarte do lodo produzido em excesso, portanto é extremamente importante que o decantador secundário e o sistema de tratamento de lodo sejam projetados para receber essa capacidade adicional. Com o aumento na concentração de SS haverá certamente aumento no consumo de oxigênio e de alcalinizante para a manutenção do pH, então, é necessário também planejar tais incrementos.

É possível que haja remoção de fósforo do sistema, mas os melhores resultados só devem ser alcançados se houver uma boa mistura entre o lodo de ETA e o efluente e/ou o esgoto e se o lodo de ETA for aplicado o quanto antes seja produzido.

Como a pesquisa com a terceira dosagem de 100 mg/L não pode ser concluída, recomenda-se repetir novamente essa dosagem e/ou aumentar a dosagem de lodo de ETA adicionado ao sistema biológico de tratamento de esgotos.

Recomenda-se também um estudo sobre o tratamento e disposição final do lodo em excesso gerado em ETEs que receberam os resíduos de ETAs.

REFERÊNCIAS

ALBRECHT, A. E. Disposal of alum sludges. *Journal of the American Water Works Association*, Baltimore, v. 64, n. 1, p. 46-52, Jan. 1972.

ALEM SOBRINHO, P.; Tratamento de esgoto e geração de lodo. In: TSUTIYA, M. *Biossólidos na agricultura*. São Paulo: SABESP, 2001. 468 p.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. American Water Works Association. Water Environmental Federation. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 18. ed. Washington: American Public Health Association, 1995. 1268 p.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. American Water Works Association. US Environmental Protection Agency. *Management of water treatment plant residuals: technology transfer handbook*. New York, N.Y.; Denver, CO : American Society of Civil Engineers: American Water Works Association, c1996. xxv, 294 p. (ASCE manuals and reports of engineering practice, n. 88).

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION RESEARCH FOUNDATION. *Slib, schlamm, sludge*. Denver, CO; [Nieuwegein, Netherlands]: AWWA Research Foundation: Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen, 1990. vii, 308 p.

ANDREOLI, C. V. (Coord.). *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. Rio de Janeiro: Rima, ABES, 2001. xxiv, 257 p. (Projeto PROSAB).

BIDONE, F.; SILVA, A.P.; MARQUES, D.M. Lodos produzidos nas estações de tratamento de água (ETAs): desidratação em leitos de secagem e codisposição em aterros sanitários. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição*. Curitiba: PROSAB, 2001. xxiv, 257 p.

CARVALHO, E. H.; DI BERNARDO, L. Interferência dos despejos de estações de tratamento de água nas estações de tratamento de esgoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20., 1997, Foz do Iguaçu, PR. *Anais...* Foz do Iguaçu, PR: ABES, 1997. Tema II-037, p. 1230-1239.

CASTRO, A.; DIAS, A.; RENNÓ, C.; CÉSAR, R.; DEMATTOS, M.; MONTEIRO, T. O problema da caracterização qualitativa e quantitativa dos efluentes gerados na

estação de tratamento de água – o caso da unidade de tratamento e recuperação de resíduos – UTR do sistema Rio das Velhas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1999, *Anais...* Rio de Janeiro, RJ, 1999. p.1423-1431.

CHAO, I. R. S. *Remoção de fósforo de efluentes de estações de tratamento biológicos de esgotos utilizando lodo de estações de tratamento de água*. 2006. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CORDEIRO, J. S. *O problema do lodo gerado em decantadores de estações de tratamento de água*. 1993. Tese (Doutorado) - Escola Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

_____. Processamento de lodos de ETAs. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição*. Curitiba: PROSAB, 2001. xxiv, 257 p.

_____.;CAMPOS, J. R. O impacto ambiental provocado pela indústria da água de abastecimento. *Saneamento Ambiental*, São Paulo, v. 10, n. 56, p. 52-57, mar./abr. 1999.

CORNWELL, D. A. American Water Works Association Foundation. *Water treatment plant waste management*. Denver, Co: AWWA Research Foundation, 1987, xx, 459 p.

DAVID, A. C. et al. *Incorporação do lodo da ETA Cubatão na indústria de bloco cerâmico*. São Paulo: AESABESP, 2002. p. 1-19.

ESCOBAR, J. C. *Tratamento e recuperação da água de lavagem dos filtros de uma estação de filtração direta e simulação da disposição de lodos em estações de tratamento de esgoto*. 2001. 136 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

FERREIRA FILHO, S. Produção e caracterização de lodo de ETA's. In: WORKSHOP: QUALIDADE DA ÁGUA E O GERENCIAMENTO DE LODO DE ETA'S, 3., 2004, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2004.

FERREIRA FILHO, S.; ALEM SOBRINHO, P. Considerações sobre o tratamento de despejos líquidos gerados em estações de tratamento de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 3, n. 3/4, p. 128-136, jul/dez. 1998.

FURREY, M.; SHAEFFER, J.; GEHO, M.; GALLO, T. Microfiltration for treatment of waste filter wash water at a North Jersey surface water treatment plant. *American Water Works Association – Water Quality Technology Conference Proceedings*. 2000. Disponível em: <<http://www.pall.com/pdf/tu08-1.pdf>>. Acesso em: 22.fev.2007.

GALARNEAU, E.; GEHR, R. Phosphorus removal from wastewaters: experimental and theoretical support for alternative mechanisms. *Water Research*, New York, v. 31, p. 328-338, 1997.

GRANDIN, S. R. *Desidratação dos lodos produzidos nas estações de tratamento de água*. 1992. 2 v. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

GUAN, X. H.; CHEN, G. H., SHANG, C. Reuse of water treatment works sludge to enhance particulate pollutant removal from sewage. *Water Research*, New York, v. 39, p. 3433-3440, 2005.

HOPPEN, C; PORTELLA, K.F. ; ANDREOLI, C.V.; SALES, A.; JOUKOSKI, A. Estudo de dosagem para incorporação do lodo de ETA em matriz de concreto, como forma de disposição final. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2003, Joinville, SC. *Anais...* Joinville, SC, 2003. p.1-9

HORAN, N. J. *Biological wastewater treatment systems: theory and operation*. Chichester; New York: Wiley, 1990. viii, 310 p.

IPPOLITO, J. A.; BARBARICK, K.A.; HEIL, D.M.; CHANDLER, J.P.; REDENTE, E.F. Phosphorus retention mechanisms of a water treatment residual. *Journal of Environmental Quality*, Madison,WI, v. 32, p.1857-1864, Sep./Oct. 2003.

JANUÁRIO, G. F. *Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos de estações de tratamento de água da região metropolitana de São Paulo*. 2005. 222 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

JORDÃO, E. P; PESSOA, C.A. *Tratamento de esgotos domésticos*. 4ª ed. Rio de Janeiro; RJ: Segrac, 2005. 932p.

MELO, A.A.; LOVO, E.; BUENO, R.C.R. *Recebimento de lodo de ETA em uma ETE*. São Paulo: AESABESP, 2002. p.1-15.

METCALF & EDDY. *Wastewater engineering: treatment and reuse*. 4th ed. Boston; London : McGraw-Hill, c2003. xxviii, 1819 p.

OLIVEIRA, A. *Avaliação do impacto do lançamento de resíduos gerados na estação de tratamento de água em sistemas de lagoas de estabilização*. 2005. 217 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PIRES, M. A. F. *Gerenciamento de lodos de ETA's: influência do lançamento do lodo de ETA no processo de tratamento de esgotos por lagoas de estabilização em cidades de pequeno porte*. São Paulo: Programa de Políticas Públicas, 2003. (Projeto fase 1).

REALI, M. A. Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs. In: _____. (Coord.). *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999. xiv, 225 p.

REIS, E.L.T. *Abordagem sistêmica do sistema de tratamento de água de Registro, São Paulo, com ênfase na avaliação do impacto do descarte dos resíduos na bacia hidrográfica do rio Ribeira de Iguape*. 2006. 166 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2006.

SALES, A.; CORDEIRO, J. S. Imobilização da fase sólida de lodos de estações de tratamento de água. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. Curitiba: PROSAB, 2001. xxiv, 257 p.

SALOTTO, B. V.; FARREL, J.B.; DEAN, R.B. The effect of water-utility sludge on the activated-sludge process. *Journal of the American Water Works Association*, Baltimore, p. 428–431, Jun. 1973.

SARON, A.; LEITE, V. M. B. Quantificação de lodo em estação de tratamento de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa, Paraíba. *Anais...* João Pessoa, Paraíba, 2001. Parte I-075, p. 1-11.

SCALIZE, P. S. *Disposição de resíduos gerados em estações de tratamento de água em estações de tratamento de esgoto*. 2003. 146 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

TEIXEIRA, S. T.; MELO W. J; SILVA, E.T. Aplicação de lodo da estação de tratamento de água em solo degradado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 40, n. 1, p. 91-94, Jan. 2005.

TSUTIYA, M. T.; HIRATA, A. Y. Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa, Paraíba. *Anais...* João Pessoa, Paraíba, 2001. Parte I-025, p. 1-9.

VAN HAANDEL, A.; MARAIS, G. *O comportamento do sistema de lodo ativado: teoria e aplicações para projeto e operações*. Campina Grande, PB: Efgraf, 1999. 472 p.

VAZOLLER, R. F. *Microbiologia de lodos ativados*. São Paulo: CETESB, 1989. 23 p. (Série manuais. Secretaria do Meio Ambiente).

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 2. ed. rev. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 1996. v. 1.

_____. *Lodos ativados: princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. 2. ed. ampl. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2002. v. 4.

YUZHU, W; MORITA, D. Condicionamento de lodo de decantadores de estação de tratamento de água: estudo de caso. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1/2, p. 74-81, jan/jun. 1998.

ANEXO 1 – DADOS PARA CÁLCULO DA PRODUÇÃO DE LODO DE ETA DO MUNICÍPIO DE JUQUITIBA (SP)

Produção mensal estimada de lodo da ETA da cidade de Juititiba, no Vale do Ribeira (adaptado de REIS. 2006):

Município	Vazão (L/s)	Coagulante	Dosagem (mg/L)	Turbidez (UNT)	Produção de lodo (ton/mês)
Juquitiba	28	Sulfato de alumínio	15	10	1,927

Outros dados utilizados para cálculo da produção de lodo de ETA:

- Consumo per capita de água (q): 175 L/hab/dia (adotado pela Sabesp para o Vale do Ribeira)
- Coeficiente de maior consumo horário (k_1): 1,2
- Turbidez $\approx$ concentração de sólidos em suspensão da água bruta (SS)
- CAP = 0 mg/L
- OA = 0 mg/L

ANEXO 2 – DADOS DO PERÍODO DE OPERAÇÃO SEM ADIÇÃO DE LODO DE ETA

Dados operacionais do sistema sem adição de lodo de ETA (continua)

Data	Dia	Semana	Temperatura	pH	OD	Proveta	IVL
			Lodo	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo
23/6/2005	1	1	17			130	
24/6/2005	2	1				140	79
28/6/2005	6	1	18		4,0	130	78
30/6/2005	8	2	21	7,4	6,0	150	82
4/7/2005	12	2	20	6,6	2,0	150	44
5/7/2005	13	2	19	6,4	3,0	160	82
7/7/2005	15	3		8,1	4,0	130	85
8/7/2005	16	3		7,5	2,0	140	68
11/7/2005	19	3		7,0			
12/7/2005	20	3		6,7	4,0	150	107
14/7/2005	22	4			4	160	110
18/7/2005	26	4	18				121
19/7/2005	27	4	19	7,6	6,0	150	105
23/7/2005	31	5	17		2,5	140	149
24/7/2005	32	5	20	8,5		160	99
28/7/2005	36	6	16				154
3/8/2005	42	7	19	5,5	1,5	170	
8/8/2005	47	7	20	7,9			102
15/8/2005	54	8	22	6,9	0,2	260	104
16/8/2005	55	8	21	6,6	3,6	310	
22/8/2005	61	9	22	6,7		290	
23/8/2005	62	9	22	6,6		290	103
25/8/2005	64	10	21	7,0		290	106
26/8/2005	65	10	21	6,7		290	115
29/8/2005	68	10	24	6,8			135
30/8/2005	69	10	22	6,7		280	203
1/9/2005	71	11	21	6,8			
2/9/2005	72	11	21	6,8		260	268
5/9/2005	75	11	21	7,1		250	235
6/9/2005	76	11	19	6,8		280	163
9/9/2005	79	12		7,0		240	225
12/9/2005	82	12	20	6,8		310	229
13/9/2005	83	12	16	6,7		310	
15/9/2005	85	13	18			480	248
16/9/2005	86	13	21			320	
19/9/2005	89	13	20	5,6		330	76
21/9/2005	91	14		6,7			111
22/9/2005	92	14		6,8		280	
26/9/2005	96	14	18	8,6			
27/9/2005	97	14	16	8,3		220	
29/9/2005	99	15	18	7,6		220	
4/10/2005	104	15	25	6,9		240	
6/10/2005	106	16	21	6,5	2	220	
10/10/2005	110	16	23	5,0	2	280	
25/10/2005	125	18				220	
27/10/2005	127	19				240	
1/11/2005	132	19				240	
3/11/2005	134	20				260	
7/11/2005	138	20				350	
8/11/2005	139	20				450	

Dados operacionais do sistema sem adição de lodo de ETA (conclusão)

Data	Dia	Semana	Temperatura	pH	OD	Proveta	IVL
			Lodo	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo
16/11/2005	147	22				550	
17/11/2005	148	22				620	
21/11/2005	152	22				710	
22/11/2005	153	22				510	
24/11/2005	155	23				350	
25/11/2005	156	23				530	
28/11/2005	159	23				590	
29/11/2005	160	23				520	
1/12/2005	162	24				530	
12/12/2005	173	25	20	5,4	2,4	730	
13/12/2005	174	25		7,3	4,0	660	
19/12/2005	180	26	22	5,4	4,5	330	
4/1/2006	196	29	23	8,3		120	
5/1/2006	197	29	21	7,8	6,0	110	
6/1/2006	198	29		7,7			
9/1/2006	201	29	27	7,0	4,7	110	
10/1/2006	202	29	23	7,0	4,7	130	
12/1/2006	204	30	25	7,3		100	
17/1/2006	209	30		8,6	5,0		
18/1/2006	210	31	25	8,2	4,0	160	
19/1/2006	211	31	25	7,9		210	
20/1/2006	212	31	24	7,5			
23/1/2006	215	31		8,0			
24/1/2006	216	31	23	8,0		200	
27/1/2006	219	32	24	6,7		240	
30/1/2006	222	32	24	7,2		250	
31/1/2006	223	32	23	7,2		220	
7/2/2006	230	33	25	7,2		250	
14/2/2006	237	34		7,0		250	
15/2/2006	238	35		7,0			
7/3/2006	258	37	23	7,0		170	
9/3/2006	260	38	23	7,0		180	
10/3/2006	261	38		7,0		160	
16/3/2006	267	39	25			140	
20/3/2006	271	39				200	
21/3/2006	272	39	24			200	
22/3/2006	273	40	25			200	
23/3/2006	274	40	25			220	
27/3/2006	278	40	22	7,0		240	

Parâmetros físico-químicos do período sem adição de lodo de ETA ao sistema (continua)

Data	Dia	Semana	DBO		DBO filtrado	DQO total		DQO filtrado	Lodo	pH		Alcalinidade	
			Afluente	Efluente	Efluente	Afluente	Efluente	Efluente		Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
22/6/2005	1	1				370	45	19	7,0	6,9	7,3		
28/6/2005	7	2				400	48	48	6,5	7,3	6,5		
7/7/2005	16	3	266	40	9	376	31	16	7,6	7,1	7,8		
12/7/2005	21	4				259	42	27	6,8	6,9	7,1		
14/7/2005	23	4				423	45	10	6,9	6,4	6,8		
19/7/2005	28	5				174	31	10	7,0	7,1	7,2	207	172
2/8/2005	42	7				600	26		6,5	7,2	6,7	357	170
4/8/2005	44	7				504	16		7,5	7,4	5,8	432	9
16/8/2005	56	9							6,4	7,1	6,7	308	64
17/8/2005	57	9				279	38	18					
23/8/2005	63	10					25	11	6,5	7,1	6,7	313	75
25/8/2005	65	10				293	44	24	6,2	7,4	6,7	288	69
30/8/2005	70	11				306	42	22	6,4	7,2	6,9	281	87
6/9/2005	77	12							6,7	7,7	6,9	241	53
13/9/2005	84	13				713	37	24	5,8	7,4	5,6	287	
21/9/2005	92	14				351	12	7	7,4	7,5	6,1	242	26
13/10/2005	114	17							6,9	6,9	5,7	118	10
18/10/2005	119	18				275	22	18	7,1	7,1	6,8	197	66
25/10/2005	126	19				222	16	9	6,7	7,2	7,2	154	120
27/10/2005	128	19	141	17	6	241	16	8	6,8	7,4	7,0	182	90
1/11/2005	133	20				334	16	8	6,8	7,1	6,7	161	
3/11/2005	135	20				306	25	15	7,0	6,8	7,3	155	148
8/11/2005	140	21				447	33	21	6,9	6,9	6,6	180	47
10/11/2005	142	21					24	16	7,5	7,4	6,9	182	
17/11/2005	149	22				223	23	13	7,7	7,2	6,2	195	17
22/11/2005	154	23				254	22	14	7,7	7,2	8,1	202	319
23/11/2005	155	23	194										
29/11/2005	161	24				432	18	17	7,3	7,2	7,4	207	66
30/11/2005	162	24	362	9									
1/12/2005	163	24							7,6				

Parâmetros físico-químicos do período sem adição de lodo de ETA ao sistema (continua)

Data	Dia	Semana	DBO		DBO filtrado	DQO total		DQO filtrado	Lodo	pH		Alcalinidade	
			Afluente	Efluente	Efluente	Afluente	Efluente	Efluente		Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
7/12/2005	169	25	206			533	18	12	7,5	7,2	6,2	192	8
15/12/2005	177	26	145	19		315	65	38	7,8	7,2	7,1		
20/12/2005	182	27				338	70	17					
10/1/2006	203	30				322	42	24	6,7	7,0	6,8	167	42
23/3/2006	275	40				305	31	28	7,2	6,8	7,4	202	

Parâmetros físico-químicos do período sem adição de lodo de ETA ao sistema (continua)

Data	Dia	Semana	Nitrogênio Total		N-NH ₃		Nitrato		Nitrito	Fósforo Total		Fósforo Solúvel	
			Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente		Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
22/6/2005	1	1			45	0	35	1273				4,3	4,8
28/6/2005	7	2					33	474				4,1	5,4
7/7/2005	16	3					48					5,3	5,6
12/7/2005	21	4					39	9				5,0	5,8
14/7/2005	23	4			49	0	31	11				5,6	5,0
19/7/2005	28	5					49					5,7	5,9
2/8/2005	42	7			80	0	46					7,1	5,3
4/8/2005	44	7					44	12				7,2	6,0
16/8/2005	56	9					38					5,8	5,8
23/8/2005	63	10			80	0	48	23					
25/8/2005	65	10					44						
30/8/2005	70	11			69	0	43					5,5	5,7
13/9/2005	84	13			75	5	47					6,5	6,3
21/9/2005	92	14					42	6				5,8	5,6
18/10/2005	119	18										6,2	5,1
25/10/2005	126	19						125		5,3		4,8	4,9
27/10/2005	128	19						181		5,6		4,9	5,5
1/11/2005	133	20					33	239	7,9	4,6		2,3	2,4
3/11/2005	135	20	51		45	2	34	959	7,0	5,0		4,9	4,5
8/11/2005	140	21			48	0	41	157				5,2	5,6
10/11/2005	142	21			26	0	40	89				4,5	5,1
17/11/2005	149	22			34	1	27	374				5,5	5,0
22/11/2005	154	23			46	0	36	45				6,2	6,0
29/11/2005	161	24	48		46	0	38	153				5,0	5,6
1/12/2005	163	24	74		55	1	29	1996	8,8	6,2		5,4	6,0
7/12/2005	169	25	62	2	48	0	31	995	7,8	5,6		5,1	5,3
13/12/2005	175	26	50		43	1	29	1830	6,4	5,5		5,4	4,8
20/12/2005	182	27					28						
10/1/2006	203	30	44		35	0	26	520	4,9	4,6		4,7	4,1
13/3/2006	265	38	81		66	0	28	597					
23/3/2006	275	40			48	1	25	1154					

Parâmetros físico-químicos do período sem adição de lodo de ETA ao sistema (continua)

Data	Dia	Semana	ST			STF			STV			SDT		
			Afluyente	Efluyente	Lodo	Afluyente	Efluyente	Lodo	Afluyente	Efluyente	Lodo	Afluyente	Efluyente	Lodo
22/6/2005	1	1			1.710			560			1.150			346
28/6/2005	7	2	240	300	1.860	100	150	500	140	150	1.360	196	292	208
7/7/2005	16	3	360		2.210	180	610	880	180	190	1.330	178		
12/7/2005	21	4	250	600	2.180	120	420	610	130	180	1.570	174	589	340
14/7/2005	23	4	380	470	2.310	200	360		180	110	1.250	280	460	434
19/7/2005	28	5	250	580	2.610	140	460	720	110	120	1.890	186	557	410
2/8/2005	42	7	440	490	2.550	200	490	720	240		1.830	326	482	478
16/8/2005	56	9	330	520	3.140	170	400	750	160	120	2.390	232	511	256
23/8/2005	63	10	330	530	2.940	150	380	710	180	150	2.230	294	480	312
25/8/2005	65	10	360	490	2.720	160	430	670	200	60	2.050	230	477	320
30/8/2005	70	11	240	390	2.850	140	350	670	100	40	2.180	144	380	190
13/9/2005	84	13	650	380	3.370	230	250	880	420	130	2.490	470	366	254
13/10/2005	114	17	250	440	2.960	120	310	780	130	130	2.180	192	427	472
18/10/2005	119	18	290	410	2.760	170	340	680	120	70	2.080	206	406	272
25/10/2005	126	19	340	570	2.640	120	440	630	220	130	2.010	254	562	496
1/11/2005	133	20	400	510	2.510	200	390	600	200	120	1.910	242	499	414
3/11/2005	135	20	430	600	2.590	170	410	650	260	190	1.940	258	588	666
8/11/2005	140	21	370	440	2.450	140	370	580	230	70	1.870	188	433	238
10/11/2005	142	21	380	550	3.190	210	420	870	170	130	2.320	306	537	798
17/11/2005	149	22	320	360	2.820	190	300	820	130	60	2.000	256	348	504
22/11/2005	154	23	380			190			190			280		
29/11/2005	161	24	440	480	2.830	160	380	650	280	100	2.180	138	472	518
7/12/2005	169	25	370	500	3.080	150	380	740	220	120	2.340	232	492	516
13/12/2005	175	26	270	600	3.030	130	480	730	140	120	2.300	231	582	366
20/12/2005	182	27	410	550	2.760	180	390	790	230	160	1.970	256	502	404
10/1/2006	203	30	300	380	2.030	150	250	640	150	130	1.390	250	372	318
14/3/2006	266	39	470	610	2.130	180	490	740	290	120	1.390	288	590	482
23/3/2006	275	40	310	570	2.550	150	430	700	160	140	1.850	264	560	374

Parâmetros físico-químicos do período sem adição de lodo de ETA ao sistema (continua)

Data	Dia	Semana	SDF			SDV			SST	SSF	SSV
			Afluente	Efluente	Lodo	Afluente	Efluente	Lodo	retorno	retorno	retorno
22/6/2005	1	1			272			346			
28/6/2005	7	2	100	150	132	196	292	208			
7/7/2005	16	3	160	609	328	178	784				
12/7/2005	21	4	120	420	314	174	589	340			
14/7/2005	23	4	192	358	736	280	460	434			
19/7/2005	28	5	140	457	372	186	557	410			
2/8/2005	42	7	196	489	368	326	482	478			
16/8/2005	56	9	160	399	286	232	511	256			
23/8/2005	63	10	136	380	278	294	480	312			
25/8/2005	65	10	148	430	310	230	477	320			
30/8/2005	70	11	132	347	242	144	380	190			
13/9/2005	84	13	210	249	220	470	366	254			
13/10/2005	114	17	110	307	364	192	427	472			
18/10/2005	119	18				206	406	272			
25/10/2005	126	19	112	439	338	254	562	496			
1/11/2005	133	20	180	389	336	242	499	414			
3/11/2005	135	20	150	408	414	258	588	666			
8/11/2005	140	21	120	370	304	188	433	238			
10/11/2005	142	21	196	418	546	306	537	798			
17/11/2005	149	22	190	300	544	256	348	504			
22/11/2005	154	23	186		548	280					
29/11/2005	161	24	138	378	358	138	472	518			
1/12/2005	163	24							7.296	904	6.392
7/12/2005	169	25	137	380	440	232	492	516			
13/12/2005	175	26	127	478	390	231	582	366	4.572	564	4.008
20/12/2005	182	27	160	384	354	256	502	404			
10/1/2006	203	30	148	250	224	250	372	318	2.880	732	2.148
14/3/2006	266	39				288	590	482	2.808		
23/3/2006	275	40	144	429	332	264	560	374			

Parâmetros físico-químicos do período sem adição de lodo de ETA ao sistema (conclusão)

Data	Dia	Semana	SST			SSF			SSV			SSV/SST
			Afluente	Efluente	Lodo	Afluente	Efluente	Lodo	Afluente	Efluente	Lodo	Lodo
22/6/2005	1	1	64	24	1.364	0	4	288	64	20	1.076	0,79
28/6/2005	7	2	44	8	1.652	0	0	368	44	8	1.284	0,78
7/7/2005	16	3	182	16	2.972	20	1	552	162	15	2.420	0,81
12/7/2005	21	4	76	11	1.840	0	0	296	76	11	1.544	0,84
14/7/2005	23	4	100	10	1.876	8	2	324	92	8	1.552	0,83
19/7/2005	28	5	64	23	2.200	0	3	348	64	20	1.852	0,84
2/8/2005	42	7	114	8	2.072	4	1	352	110	7	1.720	0,83
16/8/2005	56	9	98	9	2.884	10	1	464	88	8	2.420	0,84
23/8/2005	63	10	36	50	2.628	14	0	432	22	50	2.196	0,84
25/8/2005	65	10	130	13	2.400	12	0	360	118	13	2.040	0,85
30/8/2005	70	11	96	10	2.660	8	3	428	88	7	2.232	0,84
6/9/2005	77	12	128	5	1.880	44	0	160	84	5	1.720	0,91
13/9/2005	84	13	180	14	3.116	20	1	660	160	13	2.456	0,79
21/9/2005	92	14	120	7	2.436	12	2	384	108	5	2.052	0,84
13/10/2005	114	17	58	13	2.488	10	3	416	48	10	2.072	0,83
18/10/2005	119	18	84	4	2.488							
25/10/2005	126	19	86	8	2.144	8	1	292	78	7	1.852	0,86
27/10/2005	128	19	78	12	2.256	8	2	312	70	10	1.944	0,86
1/11/2005	133	20	158	11	2.096	20	1	264	138	10	1.832	0,87
3/11/2005	135	20	172	12	1.924	20	2	236	152	10	1.688	0,88
8/11/2005	140	21	182	7	2.212	20	0	276	162	7	1.936	0,88
10/11/2005	142	21	74	13	2.392	14	2	324	60	11	2.068	0,86
17/11/2005	149	22	64	12	2.316	0	0	276	64	12	2.040	0,88
22/11/2005	154	23	100	14	2.172	4	0	272	96	14	1.900	0,87
29/11/2005	161	24	302	8	2.312	22	2	292	280	6	2.020	0,87
1/12/2005	163	24	234	16	2.316	22	0	300	212	16	2.016	0,87
7/12/2005	169	25	138	8	2.564	13	0	300	125	8	2.264	0,88
13/12/2005	175	26	39	18	2.664	3	2	340	36	16	2.324	0,87
20/12/2005	182	27	154	48	2.356	20	6	436	134	42	1.920	0,81
10/1/2006	203	30	50	8	1.712	2	0	416	48	8	1.296	0,76
14/3/2006	266	39	182	20	1.648							
23/3/2006	275	40	46	10	2.176	6	1	368	40	9	1.808	0,83

ANEXO 3 – DADOS DO PERÍODO DE OPERAÇÃO COM ADIÇÃO DA PRIMEIRA DOSAGEM DE LODO DE ETA (25 mg/L)

Dados operacionais do sistema com adição da primeira dosagem de lodo de ETA (25mg/L)

Data	Dia	Semana	Temperatura	pH	OD	Proveta	IVL
			Lodo	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo
28/3/2006	1	1	23	7,0		220	107
29/3/2006	2	1	23	7,0	4,0	220	109
30/3/2006	3	1	21	7,0	4,0	230	93
31/3/2006	4	1	21	7,0	3,8	200	71
3/4/2006	7	2	22	7,0	3,6	200	
4/4/2006	8	2	20	7,0	3,8	200	86
5/4/2006	9	2	21	7,0	3,5	170	
6/4/2006	10	2	22	7,0	3,5	180	100
7/4/2006	11	2	21	7,2	5,2	160	
10/4/2006	14	3		7,4			
11/4/2006	15	3	22	7,0	2,8	130	
12/4/2006	16	3	21	7,0	2,8	160	76
17/4/2006	21	4	20	7,0	2,0	120	73
18/4/2006	22	4	18	7,0	4,3	160	86
24/4/2006	28	5		7,0	2,8	220	
25/4/2006	29	5	21	6,9	3,5	240	100
26/4/2006	30	5		7,0		240	
12/5/2006	46	7	18	7,1	3,0	230	
16/5/2006	50	8	18	7,0	3,5	220	
17/5/2006	51	8	17	7,0	3,7	220	
18/5/2006	52	8	17	7,0	2,8	250	76
23/5/2006	57	9	17	7,1	3,3	220	73

Parâmetros físico-químicos do período com adição da primeira dosagem de lodo de ETA (25 mg/L) ao sistema (continua)

Data	Dia	Semana	DBO		DQO total		DQO filtrado		Lodo	pH		Alcalinidade	
			Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Efluente			Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
28/3/2006	1	1			383	33	23		7,0	7,0	7,3	226	92
30/3/2006	3	1	154	5	313	22	9		6,9	6,7	7,0	179	88
4/4/2006	8	2			287	34	34		6,9	7,0	7,2	224	95
5/4/2006	9	2	240	10									
11/4/2006	15	3			273	56	32		6,6	7,0	6,8	176	93
12/4/2006	16	3	205	8									
13/4/2006	17	3			314	42	20		7,1	6,7	7,2	158	147
18/4/2006	22	4			296	26	13		6,7	7,3	7,2	225	105
19/4/2006	23	4	183	6									
20/4/2006	24	4			333	40	40		6,9	6,9	7,1	203	198
25/4/2006	29	5			376	38	27		6,8	7,1	7,1	214	139
27/4/2006	31	5	225	8	314	33	21		7,0	7,1	7,2	200	150
2/5/2006	36	6			347	37	27		7,0	7,5	6,9	215	90
3/5/2006	37	6	319	8									
4/5/2006	38	6			354	24	14		7,2	7,1	7,3	207	128
9/5/2006	43	7			676	36	29		7,0	6,9	7,3	153	131
18/5/2006	52	8	265	5	259	28	20		7,0	7,3	7,2	202	132
23/5/2006	57	9			423	47	25		7,1	7,2	7,5	263	178

Parâmetros físico-químicos do período com adição da primeira dosagem de lodo de ETA (25 mg/L) ao sistema (continua)

Data	Dia	Semana	Nitrogênio Total		N-NH ₃		Nitrato	Nitrito	Fósforo Total		Fósforo Solúvel	
			Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Efluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
28/3/2006	1	1	74	0	57	0	27	960	10,3	5,5	5,5	5,5
30/3/2006	3	1	45	0	34	0	23	784	5,3	4,6	3,3	4,2
4/4/2006	8	2	49	6	57	1	28	841	6,7	6,9	5,4	6,4
11/4/2006	15	3	46	6	38	4	27	1018	5,8	5,1	4,5	4,8
13/4/2006	17	3	65	2	38	3	20	1267	7,7	5,4	7,0	6,5
18/4/2006	22	4	48	2	57	1	22	806	7,3	4,8	5,5	4,3
20/4/2006	24	4	67	4	48	2	20	4140	8,6	5,6	5,5	4,8
25/4/2006	29	5	64	0	53	0	22	275	7,5	5,3	5,9	5,0
27/4/2006	31	5	54	1	50	0	22	232	7,7	4,7	5,4	4,2
2/5/2006	36	6	63	0	52	0	20	232	7,8	5,0	5,4	4,3
4/5/2006	38	6	45	3	49	0	26	257	8,2	5,6	5,5	3,8
9/5/2006	43	7	60	2	45	0	21	139	6,8	5,9	5,2	5,3
18/5/2006	52	8	86	1	49	0		299	7,0	6,8	7,9	6,1
23/5/2006	57	9			70	0		337				

Parâmetros físico-químicos do período com adição da primeira dosagem de lodo de ETA (25 mg/L) ao sistema (continua)

Data	Dia	Semana	ST			STF			STV			SDT		
			Afluente	Efluente	Lodo	Afluente	Efluente	Lodo	Afluente	Efluente	Lodo	Afluente	Efluente	Lodo
28/3/2006	1	1	410	450	2.340	190	390	660	220	60	1.680	240	445	284
30/3/2006	3	1	400	430	2.330	180	320	660	220	110	1.670	208	417	214
4/4/2006	8	2	380	540	2.570	170	420	750	210	120	1.820	286	528	422
11/4/2006	15	3	390	480	2.150	180	370	750	210	110	1.400	298	454	310
18/4/2006	22	4	320	460	2.210	170	350	790	150	110	1.420	204	443	342
20/4/2006	24	4	350	490	2.290	150	340	830	200	150	1.460	264	458	446
25/4/2006	29	5	390	510	2.590	160	370	910	230	140	1.680	226	497	190
2/5/2006	36	6	340	450	2.930	170	330	1080	170	120	1.850	206	431	178
4/5/2006	38	6	380	530	3.230	160	400	1110	220	130	2.120	228	514	230
9/5/2006	43	7	560	550	2.860	140	450	1070	420	100	1.790	212	533	168
18/5/2006	52	8	340	540	3.530	190	430	1130	150	110	2.400	236	524	254
23/5/2006	57	9	490	690	3.560	230	550	1140	260	140	2.420	356	664	536

Parâmetros físico-químicos do período com adição da primeira dosagem de lodo de ETA (25 mg/L) ao sistema (continua)

Data	Dia	Semana	SDF			SDV			SST	SSF	SSV
			Afluyente	Efluente	Lodo	Afluyente	Efluente	Lodo	retorno	retorno	retorno
28/3/2006	1	1	172	390	356	68	55	-72			
30/3/2006	3	1	150	318	280	58	99	-66			
4/4/2006	8	2	164	419	342	122	109	80			
11/4/2006	15	3	174	366	282	124	88	28			
18/4/2006	22	4	152	344	274	52	99	68			
20/4/2006	24	4	144	334	354	120	124	92			
25/4/2006	29	5	136	365	250	90	132	-60			
2/5/2006	36	6	150	325	288	56	106	-110			
4/5/2006	38	6	142	396	270	86	118	-40	4.896	1.396	3.500
9/5/2006	43	7	80	440	278	132	93	-110			
18/5/2006	52	8	178	426	290	58	98	-36			
23/5/2006	57	9	144	550	396	212	114	140	6.016	1.436	4.580

Parâmetros físico-químicos do período com adição da primeira dosagem de lodo de ETA (25 mg/L) ao sistema (conclusão)

Data	Dia	Semana	SST			SSF			SSV			SSV/SST
			Afluyente	Efluente	Lodo	Afluyente	Efluente	Lodo	Afluyente	Efluente	Lodo	Lodo
28/3/2006	1	1	170	5	2.056	18	0	304	152	5	1.752	0,85
30/3/2006	3	1	192	13	2.116	30	2	380	162	11	1.736	0,82
4/4/2006	8	2	94	12	2.148	6	1	408	88	11	1.740	0,81
11/4/2006	15	3	92	26	1.840	6	4	468	86	22	1.372	0,75
13/4/2006	17	3	86	19	1.696	8	3	404	78	16	1.292	0,76
18/4/2006	22	4	116	17	1.868	18	6	516	98	11	1.352	0,72
20/4/2006	24	4	86	32	1.844	6	6	476	80	26	1.368	0,74
25/4/2006	29	5	164	13	2.400	24	5	660	140	8	1.740	0,73
27/4/2006	31	5	134	19	2.752							
2/5/2006	36	6	152	16	3.000	20	5	792	114	14	1.960	0,71
4/5/2006	38	6	348	17	2.692	18	4	840	134	12	2.160	0,72
9/5/2006	43	7	104	16	3.276	60	10	792	288	7	1.900	0,71
18/5/2006	52	8	134	26	3.024	12	4	840	92	12	2.436	0,74
23/5/2006	57	9				86	0	744	48	26	2.280	0,75

ANEXO 4 - DADOS DO PERÍODO DE OPERAÇÃO COM ADIÇÃO DA SEGUNDA DOSAGEM DE LODO DE ETA (50 mg/L)

Dados operacionais do sistema com adição da segunda dosagem de lodo de ETA (50mg/L)

Data	Dia	Semana	Temperatura	pH	OD	Proveta	IVL
			Lodo	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo
24/5/2006	1	1	17	7,0	2,2	230	
25/5/2006	2	1	16	7,0	4,5		
29/5/2006	6	1	23		2,0	350	
30/5/2006	7	2	18	7,0	3,7	660	176
7/6/2006	15	3	19	7,0	3,3	470	
8/6/2006	16	3	18	7,2	3,0	500	130
9/6/2006	17	3	18	7,0	3,5	600	
12/6/2006	20	3	17	7,0	3,0	310	90
13/6/2006	21	4	18	7,0	2,8	210	
14/6/2006	22	4	20	7,0	2,9	230	
19/6/2006	27	4	23	7,2	0,5	210	
20/6/2006	28	5	20	7,0	1,5	240	65
21/6/2006	29	5	20	7,0	2,8	240	
22/6/2006	30	5	18	7,0	3,5	220	58
23/6/2006	31	5	20	7,0	1,2	240	
26/6/2006	34	5	18	7,0	3,2	210	
27/6/2006	35	6	16	7,0	3,5	200	52
3/7/2006	41	6	17	7,3	2,5		
4/7/2006	42	7	18		2,5	130	41
5/7/2006	43	7	14		4,0	120	
6/7/2006	44	7	18	7,1	1,0		
13/7/2006	51	8	20	7,1		110	
17/7/2006	55	8		7,0		90	
18/7/2006	56	9	15	7,0	5,0	90	43
19/7/2006	57	9	16	7,0	4,5	90	
20/7/2006	58	9					40
21/7/2006	59	9	15	7,3	5,5	90	
27/7/2006	65	10	17	7,3	6,0	70	
1/8/2006	70	11	14	7,2	4,5	100	
2/8/2006	71	11	15	7,0	5	110	
8/8/2006	77	12	18	7,3	5	90	40
9/8/2006	78	12	18	7,0	1,7	100	
10/8/2006	79	12	18	7,1	4,5	110	44
3/10/2006	133	20	20	7,1		250	74
5/10/2006	135	20	20	7,1	2,5	270	103
10/10/2006	140	21	21	7,1	3,5	250	75

Parâmetros físico-químicos do período com adição da segunda dosagem de lodo de ETA (50 mg/L) ao sistema (continua)

Data	Dia	Semana	DBO	DBO	DQO total	DQO total	DQO	pH	pH	pH	Alcalinidade	Alcalinidade
			Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	filtrado	Lodo	Afluente	Efluente	Entrada	Saída
25/5/2006	1	1			408	29	19	6,7	7,3	7,3	274	140
8/6/2006	15	3			450	37	33	6,8	7,3	7,0	262	129
12/6/2006	19	3			377	43	19	6,9	7,7	6,7	298	58
14/6/2006	21	4	297	6								
21/6/2006	28	5	224	8								
22/6/2006	29	5			439	32	18	6,6	7,1	6,8	243	91
27/6/2006	34	5			315	43	23	6,7	7,5	7,0	285	81
28/6/2006	35	6	258									
29/6/2006	36	6			250	50	23	6,7	7,4	7,3	253	110
18/7/2006	55	8			185	47	29	6,8	7,1	7,0	406	95
20/7/2006	57	9			208	38	27	7,0	7,0	6,9	418	115
8/8/2006	76	11			377	26	23	7,1	7,3	7,0	238	130
10/8/2006	78	12			366	63	51	7,3	6,8	7,3	237	219
28/9/2006	127	19			469	37	27	6,6	7,1	7,1	248	150
3/10/2006	132	19			360	40	26	6,7	6,6	6,8	181	153
5/10/2006	134	20	267	30	600	59	29	7,0	6,6	7,0	195	162
10/10/2006	139	20	386	11	497	43	22	6,9	6,8	7,2	236	163

Parâmetros físico-químicos do período com adição da segunda dosagem de lodo de ETA (50 mg/L) ao sistema (continua)

Data	Dia	Semana	Nitrogênio Total		N-NH ₃		Nitrato	Nitrito	Fósforo Total		Fósforo Solúvel	
			Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Efluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
25/5/2006	1	1	62	0	78	0	23		8,3	5,0	9,1	5,6
8/6/2006	15	3	86	6	67	1	26	260	10,2	6,5	7,7	5,8
12/6/2006	19	3	95	4	80	0	53		10,0	6,1	9,0	6,3
22/6/2006	29	5	72	1	62	0	48	562	9,4	6,2	5,9	5,8
27/6/2006	34	5	90	2	77	0		208	9,9	6,7	7,4	6,0
29/6/2006	36	6	70	2	66	1		847	8,7	7,2	6,7	6,0
18/7/2006	55	8	91	0	88	1		952	11,0	9,1	9,7	8,6
20/7/2006	57	9	96	0	87	0		1003	9,5	8,4	8,3	6,7
8/8/2006	76	11	63	0	50	1			7,2	5,6	5,2	5,1
10/8/2006	78	12	59	7	50	5	55	2622	7,0	5,5	5,6	4,5
28/9/2006	127	19	73	0	60	0						
3/10/2006	132	19	78	0	62	0	38	761	6,0	8,0	4,9	4,3
5/10/2006	134	20	59	11	54	2	33	1114	8,6	6,1	5,5	4,1
10/10/2006	139	20			63	0	46	204	11,1	9,3	9,6	5,1

Parâmetros físico-químicos do período com adição da segunda dosagem de lodo de ETA (50 mg/L) ao sistema (continua)

Data	Dia	Semana	ST			STF			STV			SDT		
			Afluente	Efluente	Lodo	Afluente	Efluente	Lodo	Afluente	Efluente	Lodo	Afluente	Efluente	Lodo
25/5/2006	1	1	380	540	3.660	200	420	1.130	180	120	2.530	264	535	164
8/6/2006	15	3	490	550	4.050	230	440	1.430	260	110	2.620	344	535	214
12/6/2006	19	3	390	580	3.890	200	390	1.440	190	190	2.450	266	544	430
22/6/2006	29	5	460	650	4.010	170	440	1.400	290	210	2.610	238	627	246
27/6/2006	34	5	370	600	4.250	170	360	1.440	200	240	2.810	270	552	418
29/6/2006	36	6	370	660	4.210	220	510	1.490	150	150	2.720	308	635	554
18/7/2006	55	8	430	710	2.710	220	510	1.120	210	200	1.590	360	689	614
20/7/2006	57	9	430	790	2.990	250	660	1.280	180	130	1.710	332	777	762
8/8/2006	76	11	440	720	2.810							308	705	546
28/9/2006	127	19	450	740	3.500	180	550	1.230	270	190	2.270	314	723	508
3/10/2006	132	19				130	420	1.240						
5/10/2006	134	20	370	610	3.150							258	575	525

Parâmetros físico-químicos do período com adição da segunda dosagem de lodo de ETA (50 mg/L) ao sistema (continua)

Data	Dia	Semana	SDF			SDV			SST	SSF	SSV
			Afluente	Efluente	Lodo	Afluente	Efluente	Lodo	retorno	retorno	retorno
25/5/2006	1	1	182	420	322	82	115				
8/6/2006	15	3	212	436	310	132	99		6.396	1.924	4.472
12/6/2006	19	3	188	354	308	78	190	122			
22/6/2006	29	5	146	437	340	92	190		9.436	2.740	6.696
27/6/2006	34	5	154	349	296	116	203	122	6.228	1.908	4.320
29/6/2006	36	6	220	510	410	88	125	144	6.420	1.884	4.536
18/7/2006	55	8	212	505	396	148	184	218	3.480	1.192	2.288
20/7/2006	57	9	240	657	456	92	120	306	2.452	896	1.556
8/8/2006	76	11							2.912	1.120	1.792
10/8/2006	78	12							4.500		
28/9/2006	127	19	158	542	378	156	181	130	4.552	1.292	3.260
3/10/2006	132	19	118	418	315				8.485	2.525	5.960
5/10/2006	134	20							10.195	2.920	7.275
10/10/2006	139	20							8.700		

Parâmetros físico-químicos do período com adição da segunda dosagem de lodo de ETA (50 mg/L) ao sistema (conclusão)

Data	Dia	Semana	SST			SSF			SSV			SSV/SST
			Afluente	Efluente	Lodo	Afluente	Efluente	Lodo	Afluente	Efluente	Lodo	Lodo
25/5/2006	1	1	116	5	3.496	18	0	808	98	5	2.688	0,77
8/6/2006	15	3	146	15	3.836	18	4	1120	128	11	2.716	0,71
12/6/2006	19	3	124	36	3.460	12	36	1132	112	0	2.328	0,67
22/6/2006	29	5	222	23	3.764	24	3	1060	198	20	2.704	0,72
27/6/2006	34	5	100	48	3.832	16	11	1144	84	37	2.688	0,70
29/6/2006	36	6	62	25	3.656	0	0	1080	62	25	2.576	0,70
18/7/2006	55	8	70	21	2.096	8	5	724	62	16	1.372	0,65
20/7/2006	57	9	98	13	2.228	10	3	824	88	10	1.404	0,63
8/8/2006	76	11	132	15	2.264	16	4	864	116	11	1.400	0,62
10/8/2006	78	12	122	21	2.520							
28/9/2006	127	19	136	17	2.992	22	8	852	114	9	2.140	0,72
3/10/2006	132	19	93	19	3.400	12	2	925	81	17	2.475	0,73
5/10/2006	134	20	112	35	2.625	22	11	770	90	24	1.855	0,71
10/10/2006	139	20	134	24	3.355							

ANEXO 5 - DADOS DO PERÍODO DE OPERAÇÃO COM ADIÇÃO DA TERCEIRA DOSAGEM DE LODO DE ETA (100 mg/L)

Dados operacionais do sistema com adição da terceira dosagem de lodo de ETA (100mg/L)

Data	Dia	Semana	Temperatura	pH	OD	Proveta	IVL
			Lodo	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo
7/11/2006	1	1	21	7,1	4,0	320	92
8/11/2006	2	1	19	7,1	4,0	280	
9/11/2006	3	1	17	7,1	4,0	300	104
14/11/2006	8	2	18	7,1	3,5	260	90
16/11/2006	10	2	20	7,1	3,0	260	84

Parâmetros físico-químicos do período com adição da terceira dosagem de lodo de ETA (100 mg/L) ao sistema (continua)

Data	Dia	Semana	DBO		DQO total		DQO filtrado		pH		Alcalinidade	
			Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Efluente	Lodo	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
7/11/2006	1	1			190	70	39	6,92	7,11	7,18	227	153
8/11/2006	2	1	306	15								
9/11/2006	3	1			273	55	32	7,09	7,13	7,31	246	171
14/11/2006	8	2			263	57	28	7,18	7,43	7,23	258	170
16/11/2006	10	2	128	9	246	36	22	7,18	7,31	7,29	245	160

Parâmetros físico-químicos do período com adição da terceira dosagem de lodo de ETA (100 mg/L) ao sistema (continua)

Data	Dia	Semana	Nitrogênio Total		N-NH ₃		Nitrato	Nitrito	Fósforo Total		Fósforo Solúvel	
			Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Efluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
7/11/2006	1	1	59	0,0	55	0,0	48	626	6,6	8,0	5,1	6,5
9/11/2006	3	1	64	0,0	57	0,4	46	728	7,0	8,8	4,2	3,7
14/11/2006	8	2	73	4,5	64	0,0	48	630	6,9	6,5	3,7	3,5
16/11/2006	10	2	67	2,8	57	0,0	44	497	6,9	5,8	3,6	4,1

Parâmetros físico-químicos do período com adição da terceira dosagem de lodo de ETA (100 mg/L) ao sistema (continua)

Data	Dia	Semana	ST			STF			STV			SDT		
			Afluente	Efluente	Lodo	Afluente	Efluente	Lodo	Afluente	Efluente	Lodo	Afluente	Efluente	Lodo
7/11/2006	1	1	340	690	3.770	160	460	1.370	180	230	2.400	266	648	294
9/11/2006	3	1	330	660	3.720	130	440	1.360	200	220	2.360	272	626	456
14/11/2006	8	2	370	730	3.420	180	540	1.300	190	190	2.120	282	696	536
16/11/2006	10	2	420	700	3.580	150	430	1.310	270	270	2.270	354	676	472

Parâmetros físico-químicos do período com adição da terceira dosagem de lodo de ETA (100 mg/L) ao sistema (continua)

Data	Dia	Semana	SDF			SDV			SST	SSF	SSV
			Afluente	Efluente	Lodo	Afluente	Efluente	Lodo	retorno	retorno	retorno
7/11/2006	1	1	150	448	310	116	200		5.885	1.780	4.105
9/11/2006	3	1	118	416	244	154	210	212	6.230	2.085	4.145
14/11/2006	8	2	174	535	400	108	161	136	4.088	1.292	2.796
16/11/2006	10	2	142	421	314	212	255	158	5.652	1.816	3.836

Parâmetros físico-químicos do período com adição da terceira dosagem de lodo de ETA (100 mg/L) ao sistema (conclusão)

Data	Dia	Semana	SST			SSF			SSV			SSV/SST
			Afluente	Efluente	Lodo	Afluente	Efluente	Lodo	Afluente	Efluente	Lodo	Lodo
7/11/2006	1	1	74	42	3.476	10	12	1.060	64	30	2.416	0,70
9/11/2006	3	1	58	34	3.264	12	24	1.116	46	10	2.148	0,66
14/11/2006	8	2	88	34	2.884	6	5	900	82	29	1.984	0,69
16/11/2006	10	2	66	24	3.108	8	9	996	58	15	2.112	0,68

ANEXO 6 – EQUAÇÕES PARA O CÁLCULO DO BALANÇO DE MASSA NO SISTEMA

Equações para cálculo do coeficiente de produção celular observada (Y_{obs}) e da fração biodegradável dos sólidos gerados no sistema submetidos a uma idade do lodo (f_b):

$$Y_{obs} = Y / 1 + (f_b \cdot k_d \cdot \theta_c)$$

$$f_b = f_b' / 1 + ((1-f_b') \cdot k_d \cdot \theta_c)$$

Equações utilizadas para os cálculos de produção de sólidos teórica:

1) Sólidos do esgoto

- sólidos em suspensão totais P_x (g/dia):
 P_x (g/dia) = Vazão de esgoto . Concentração SST afluyente
- Sólidos em suspensão voláteis P_{xv} (g/dia):
 P_{xv} (g/dia) = P_x . (relação SSV/SST no esgoto)
- Sólidos em suspensão voláteis biodegradáveis P_{xvb} (g/dia):
 P_{xvb} (g/dia) = P_{xv} . (relação SS_b /SSV no esgoto)
- Sólidos em suspensão voláteis não biodegradáveis P_{xnb} (g/dia):
 P_{xnb} (g/dia) = P_{xv} - P_{xvb}
- Sólidos em suspensão inorgânicos P_{xi} (g/dia):
 P_{xi} (g/dia) = P_x - P_{xv}

2) Sólidos do lodo de ETA

- Sólidos em suspensão totais P_x (g/dia):
 P_x (g/dia) = Vazão de esgoto . Concentração SST do lodo de ETA
- Sólidos em suspensão voláteis P_{xv} (g/dia):
 P_{xv} (g/dia) = P_x . (relação SSV/SST no lodo de ETA)
- Sólidos em suspensão voláteis biodegradáveis P_{xvb} (g/dia):

$$P_{xvb} \text{ (g/dia)} = P_{xv} \cdot (\text{relação } SS_b/SSV \text{ no lodo de ETA})$$

- Sólidos em suspensão voláteis não biodegradáveis P_{xnb} (g/dia):

$$P_{xnb} \text{ (g/dia)} = P_{xv} - P_{xb}$$

- Sólidos em suspensão inorgânicos P_{xi} (g/dia):

$$P_{xi} \text{ (g/dia)} = P_x - P_{xv}$$

3) Sólidos biológicos produzidos no reator

- Produção bruta de sólidos em suspensão voláteis ($P_{xv \text{ bruta}}$)

$$P_{xv \text{ bruta}} = Y \cdot Q \cdot (\text{DBO}_{\text{afluente}} - \text{DBO}_{\text{efluente}})$$

- Produção bruta de sólidos em suspensão totais ($P_{x \text{ bruta}}$)

$$P_{x \text{ bruta}} = P_{xv \text{ bruta}} / 0,90$$

- Produção de sólidos fixos (P_{xi})

$$P_{xi} = P_{x \text{ bruta}} - P_{xv \text{ bruta}}$$

- Produção líquida de sólidos em suspensão voláteis ($P_{xv \text{ líquida}}$)

$$P_{xv \text{ líquida}} = Y_{\text{obs}} \cdot Q \cdot (\text{DBO}_{\text{afluente}} - \text{DBO}_{\text{efluente}})$$

- Produção líquida de sólidos em suspensão voláteis biodegradáveis ($P_{xb \text{ líquida}}$)

$$P_{xb \text{ líquida}} = P_{xb \text{ bruta}} - P_{xb \text{ destruída}}$$

- Produção bruta de sólidos em suspensão voláteis biodegradáveis ($P_{xb \text{ bruta}}$)

$$P_{xb \text{ bruta}} = P_{xv \text{ bruta}} \cdot f_b$$

- Produção de sólidos em suspensão voláteis biodegradáveis destruídos ($P_{xb \text{ destruída}}$)

$$P_{xb \text{ destruída}} = P_{xb \text{ bruta}} \cdot (k_d \theta_c) / (1 + (f_b \cdot k_d \cdot \theta_c))$$

- Produção de sólidos em suspensão voláteis não biodegradáveis formados (P_{xnb})

$$P_{xnb} = P_{xv \text{ bruta}} - P_{xb \text{ bruta}}$$

- Produção de sólidos em suspensão voláteis não biodegradáveis líquida ($P_{xnb \text{ líquida}}$)

$$P_{xnb \text{ líquida}} = P_{xnb} - P_{xb \text{ destruída}}$$

- Produção líquida de sólidos em suspensão ($P_{x \text{ líquida}}$)

$$P_{x \text{ líquida}} = P_{xv \text{ líquida}} + P_{xi}$$

- Relação SSV/SST dos sólidos em suspensão produzidos

$$SSV/SST = P_{xv \text{ líquida}} / P_{x \text{ líquida}}$$

4) Produção total de sólidos (afluente + reator)

- Produção total de sólidos em suspensão totais (P_x)

$$P_x = P_{xv} + P_{xi}$$

- Produção total de sólidos em suspensão totais voláteis (P_{xv})

$$P_{xv} = P_{xnb} + P_{xb}$$

- Produção total de sólidos em suspensão totais voláteis não biodegradáveis (P_{xnb})

$$P_{xnb} = P_{xnb} \text{ sólidos biológicos} + P_{xnb} \text{ sólidos afluentes}$$

- Produção total de sólidos em suspensão totais voláteis biodegradáveis (P_{xb})

$$P_{xb} = P_{xb} \text{ líquida sólidos biológicos} - P_{xb} \text{ sólidos do esgoto}$$

$$P_{xb} \text{ sólidos do esgoto} = 0 \text{ (já foi calculado na DBO)}$$

- Produção total de sólidos em suspensão inorgânicos (P_{xi})

$$P_{xi} = P_{xi} \text{ sólidos afluentes} + P_{xi} \text{ sólidos biológicos}$$

- Relação SSV/SST dos sólidos em suspensão totais produzidos

$$SSV/SST = P_{xv} / P_x$$

- Relação de sólidos em suspensão produzidos pela carga de DBO removida

$$SS / DBO_{\text{removida}} = P_x / Q \cdot (DBO_{\text{afluente}} - DBO_{\text{efluente}})$$