



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

CAROLINE COLDEBELLA

**HIGIENIZAÇÃO ALCALINA DE LODO DE ETE DE
DIGESTOR ANAERÓBIO EM REATOR FECHADO**

Londrina
2015

CAROLINE COLDEBELLA

**HIGIENIZAÇÃO ALCALINA DE LODO DE ETE DE
DIGESTOR ANAERÓBIO EM REATOR FECHADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Edificações e Saneamento, promovido pelo Centro de Tecnologia e Urbanismo – CTU, da Universidade Estadual de Londrina, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Deize Dias Lopes

Londrina
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Coldebella, Caroline.

Higienização alcalina de lodo de ETE de digestor anaeróbio em reator fechado / Caroline Coldebella. - Londrina, 2015.
112 f. : il.

Orientador: Deize Dias Lopes.

dissertação) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, 2015.
Inclui bibliografia.

1. Lodo de esgoto - Teses. 2. Estabilização alcalina - Teses. 3. Caleação - Teses. 4. Ovos de helmintos - Teses. I. Dias Lopes, Deize. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento. III. Título.

CAROLINE COLDEBELLA

**HIGIENIZAÇÃO ALCALINA DE LODO DE ETE DE DIGESTOR
ANAERÓBIO EM REATOR FECHADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Edificações e Saneamento, promovido pelo Centro de Tecnologia e Urbanismo – CTU, da Universidade Estadual de Londrina, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof^a. Dr^a Deize Dias Lopes
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Fernando Fernandes
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof^a Dr^a Liza Ogawa
Universidade Estadual do Norte do Paraná -
UENP

Prof. Dr. Miguel Mansur Aisse
Universidade Federal do Paraná - UFPR

Londrina, 12 de Dezembro de 2015.

*Aos meus pais, Ércio e Mariza,
aos meus irmãos Gustavo e Henrique,
ao meu namorado Fernando
e a todos aqueles que amo e que sempre me apoiaram.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela saúde, sabedoria e força para superar as dificuldades, e por me iluminar durante todo o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

Aos meus pais, Ércio e Mariza, meus pilares e meus heróis, que sempre acreditaram na minha capacidade e me apoiaram em todas as decisões, me dando todo suporte necessário, financeiro e emocional, para realização dos meus estudos.

Aos meus irmãos, Gustavo e Henrique, pelo carinho, paciência, compreensão e ajuda quando precisei.

Ao meu namorado Fernando, pela motivação para a realização do mestrado, pelo companheirismo nas idas ao laboratório nos fins de semana; pela amizade, paciência, apoio, amor e compreensão durante os momentos alegres e também nos momentos mais difíceis. Pela parceria de sempre e pela confiança.

À minha vó Dirce e minha tia Néia, que vibraram quando ingressei no curso e que torcem por mim sempre.

À Prof^a Deize, por ter me aceito como orientada; por embarcar numa pesquisa fora de sua área de atuação; pelo compartilhamento de seus conhecimentos; pela dedicação, compreensão e paciência quando as coisas pareciam que não dariam certo e principalmente pela amizade criada.

Ao Prof^o Fernando que sempre esteve a disposição para me ajudar e tirar minhas dúvidas; por dividir seus conhecimentos e pela participação na banca de qualificação e defesa.

À Prof^a Liza que contribuiu com seus conhecimentos e seu trabalho para que esta pesquisa pudesse acontecer. Obrigada pela parceria, pela disponibilização de material de apoio, pelos esclarecimentos na metodologia utilizada e por ter aceito fazer parte da minha banca de qualificação e defesa.

Ao Prof^o Miguel Mansur Aisse pela participação na banca de defesa.

Aos companheiros e amigos de laboratório, Camila “UTF”, Camila “TCC”, Thais, Flávia, Isa, Juliana, Rubieli, pelas discussões sobre temas pertinentes às nossas pesquisas, pelo companheirismo e auxílio nas análises laboratoriais, pela troca de ideias, pelo apoio e palavras de conforto nos momentos difíceis dos experimentos e pelos inúmeros momentos de descontração.

Ao Ivan, técnico do laboratório de Hidráulica e Saneamento, por toda ajuda na montagem do equipamento, pelas ideias e por toda colaboração durante a pesquisa.

Ao Carlos, técnico da maquetaria, e ao César, do setor de equipamentos da UEL, também pela ajuda na montagem do equipamento.

Ao Prof. Aron pela colaboração indispensável na solução do problema com o equipamento e pelas ideias, seus conhecimentos foram de grande importância para que o experimento realmente acontecesse.

À Prof^a Jacinta, pela contribuição na escolha da metodologia para determinação de coliformes e pelo empréstimo de material.

Aos aluno de iniciação científica Márcio, por toda ajuda nas análises laboratoriais, principalmente na reta final dos experimentos.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo durante o desenvolvimento da presente pesquisa.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento

(ENGES), da Universidade Estadual de Londrina (UEL), pela oportunidade.

À Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) pelo fornecimento do lodo de esgoto, ao Leandro pela atenção dada em todas as idas à estação de tratamento e principalmente aos operadores da estação de tratamento pela ajuda em todas as coletas.

Aos familiares e amigos, que torceram pelo meu sucesso e que de alguma forma colaboram durante o período do desenvolvimento deste trabalho.

*“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades,
lembrai-vos de que as grandes coisas do homem
foram conquistadas do que parecia impossível.”*

Charles Chaplin

COLDEBELLA, Caroline. **Higienização alcalina de lodo de ETE de digestor anaeróbio em reator fechado**. 2015. 112f Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o processo de higienização alcalina de lodo de esgoto digerido por processo anaeróbio em reator de manta de lodo, coletado após o processo de desidratação, utilizando reator piloto fechado com misturador, a fim de estudar uma possível otimização do processo. Para o processo de higienização foi utilizada cal virgem comercial, do tipo dolomítica, como agente alcalinizante com dosagens de 20%, 30% e 40% em relação ao peso seco. Os experimentos ocorreram em duas etapas, sendo a primeira desenvolvida em um reator de mistura fechado durante 48 horas e a segunda em leitos abertos até completar 45 dias. A mistura foi realizada de forma intermitente. Os parâmetros avaliados foram: temperatura, pH, ST, STV, umidade, NKT, N-amoniaco, fósforo, metais (Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Se), coliformes termotolerantes e viabilidade de ovos de helmintos. A análise dos resultados permitiram verificar que a elevação da temperatura, durante o processo, está associada à umidade inicial do lodo. Isto explica o fato das temperaturas atingidas durante o experimento serem na faixa de 30°C, para lodo com umidade inicial aproximada de 80%. O sistema proposto não proporcionou elevação imediata do pH ao nível recomendado (pH=12 ou mais). Porém, os valores de pH registrados após 2 horas, 24 horas e 48 horas, para todos os tratamentos, se mostraram de acordo com o exigido pelas normativas que visam o uso agrônomo de lodo. Em relação aos parâmetros sanitários, todas as dosagens de cal aplicadas foram eficientes na redução de coliformes termotolerantes aos níveis abaixo do estabelecido ($< 10^3$ NMP/g ST) e a dosagem de 40% se mostrou mais eficiente na inviabilização de ovos de helmintos, atingindo 100% de remoção em 24 horas de mistura dentro do reator. Diante disso, é possível afirmar que a higienização alcalina, em reator fechado, possibilita obter um biossólido com características sanitárias adequadas à aplicação na agricultura (classe A) em um menor tempo de contato.

Palavras-chave: Lodo de esgoto. Estabilização alcalina. Caleação. Ovos de helmintos.

COLDEBELLA, Caroline. **Alkaline sanitation of anaerobic digester sludge of sewage treatment plant in a closed reactor.** 2015. 112p. Dissertation (Master's Degree in Buildings and Sanitation Engineering) – Center of Technology and Urbanism, State University of Londrina, Londrina, 2015.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the alkaline sanitation process of the sewage sludge digested by anaerobic process in Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), collected after dewatering process, using closed reactor with mixer in order to study a possible process optimization. For the process of sanitation it was used commercial dolomitic quicklime as an alkalizing agent with dosages of 20%, 30% and 40% on dry weight. The experiments occurred in two stages, the first being conducted in a closed mixing reactor during 48h and the rest of the process proceed in open beds. The mixture was intermittently performed. The parameters evaluated were: temperature, pH, TS, VTS, humidity, TNK, N-ammonia, phosphorus, metals (Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Se), thermotolerant coliforms and viability of helminth eggs. The results allowed to verify that the temperature rise during the process is associated with initial moisture of sludge. This explains the fact that the temperatures reached during the experiment being in the 30 ° C range for sludge with approximate initial moisture content of 80%. The proposed system didn't provide immediate raising the pH to the recommended level (pH = 12 or more). However, pH values recorded after 2 hours, 24 hours and 48 hours, for all treatments, shown in accordance to what is required by regulations. With respect to health parameters, all lime dosages applied were effective in reducing the thermotolerants coliforms levels below established ($<10^3$ MPN/g ST) and 40% dosage was more efficient in the invariability helminth eggs, reaching 100% removal within 24 hours of mixing within the reactor. Therefore, it is possible to say that the alkaline sanitation in a closed reactor allows get a biosolids with sanitary characteristics suitable for application in agriculture in a smaller contact time.

Keywords: Sewage sludge. Alkaline stabilization. Liming. Helminth eggs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Níveis de tratamento de esgoto em uma estação de tratamento completa	22
Figura 2 – Esquema representativo do sistema de tratamento utilizado na ETE Norte	56
Figura 3 – Esquema representativo da instalação experimental	58
Figura 4 – Instalação experimental.....	58
Figura 5 – Variação de temperatura durante o tempo de mistura dentro do reator para as bateladas com dosagem de cal de 20%.....	66
Figura 6 - Variação de temperatura durante o tempo de mistura dentro do reator para as bateladas com dosagem de cal de 30%.....	66
Figura 7 - Variação de temperatura durante o tempo de mistura dentro do reator para as bateladas com dosagem de cal de 40%.....	67
Figura 8 – Temperaturas atingidas imediatamente após a adição de cal em função da umidade do lodo para as três dosagens de cal estudadas	70
Figura 9 – Variação de pH nos experimentos de caleação com dosagem de cal de 20%	70
Figura 10 – Variação de pH nos experimentos de caleação com dosagem de cal de 30%	71
Figura 11 – Variação de pH nos experimentos de caleação com dosagens de cal de 40%	71
Figura 12 – Variação do pH em relação ao tempo para cada uma das dosagens de cal estudadas – Bateladas dentro do reator.....	72
Figura 13 – Variação de pH em função do tempo para cada uma das dosagens de cal estudadas – Bateladas realizadas manualmente	73
Figura 14 – Valores médios de sólidos totais (ST) e da relação SV/ST das três repetições de cada dosagem de cal aplicada no decorrer do tempo de higienização	75
Figura 15 – Teores de umidade e concentração de sólidos totais dos tratamentos em função do tempo de mistura e armazenamento	77
Figura 16 – Concentrações de N-Amoniacal e NKT ao longo do tempo para caleação de 20%	78
Figura 17 – Concentrações de N-Amoniacal de NKT ao longo do tempo para caleação	

de 30%	78
Figura 18 – Concentrações de N-Amoniacal e NKT ao longo do tempo para caleação de 40%	79
Figura 19 – Média das concentrações de NKT no lodo no decorrer do tempo para os tratamentos com 20%, 30% e 40%	80
Figura 20 – Média das concentrações de N-Amoniacal no lodo no decorrer do tempo para os tratamentos com 20%, 30% e 40%	80
Figura 21 – Logaritmo do número mais provável de coliformes termotolerantes (<i>E. coli</i>) ao longo do tempo para caleação de 20%.....	83
Figura 22 – Logaritmo do número mais provável de coliformes termotolerantes (<i>E. coli</i>) ao longo do tempo para caleação de 30%.....	84
Figura 23 – Logaritmo do número mais provável de coliformes termotolerantes (<i>E. coli</i>) ao longo do tempo para a caleação de 40%.....	84
Figura 24 – Ovo de <i>Ascaris</i> sp observado no lodo de esgoto	85
Figura 25 – Ovo de <i>Trichuris</i> sp observado no lodo de esgoto	85
Figura 26 – Ovo larvado de <i>Capillaria</i> sp observado no lodo de esgoto	86
Figura 27 – Ovo de <i>Hymenolepis nana</i> observado no lodo de esgoto	86
Figura 28 – Ovo larvado de <i>Toxocara</i> sp observado no lodo de esgoto	86
Figura 29 – Viabilidade de ovos viáveis de helmintos por grama de ST ao longo do tempo para os experimentos de caleação com dosagem de 20%	86
Figura 30 – Viabilidade de ovos viáveis de helmintos por grama de ST ao longo do tempo para os experimentos de caleação com dosagem de 30%	87
Figura 31 – Viabilidade de ovos viáveis de helmintos por grama de ST ao longo do tempo para os experimentos de caleação com dosagem de 40%	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção de lodo biológico anaeróbico em reatores tipo UASB tratando esgoto sanitário	26
Tabela 2 – Composição típica do lodo primário bruto e digerido e do lodo de excesso de lodos ativados bruto	27
Tabela 3 – Principais agentes patogênicos presentes no lodo de esgoto	29
Tabela 4 – Teores de metais pesados em lodo de diferentes sistemas de tratamento de esgoto no Brasil.....	30
Tabela 5 – Limites máximos de metais pesados aceitos no lodo de esgoto pelas principais normas brasileiras	30
Tabela 6 – Etapas usuais do processamento do lodo biológico nos sistemas de tratamento de esgoto mais utilizados	31
Tabela 7 – Regimes tempo-temperatura para lodos Classe A propostos pela USEPA	36
Tabela 8 – Quantidades de lodo utilizadas para fins agrícolas no Brasil	50
Tabela 9 – Classes de lodo de esgoto ou produto derivado no que se refere aos indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos	52
Tabela 10 – Substâncias orgânicas potencialmente tóxicas a serem determinadas no lodo de esgoto ou produto derivado	53
Tabela 11 – Concentração máxima permitida de substâncias inorgânicas em lodos de esgoto	54
Tabela 12 – Classificação da cal quanto ao teor de CaO	55
Tabela 13 – Características do esgoto afluente à estação de tratamento	57
Tabela 14 – Parâmetros analisados, metodologia aplicada e frequência de monitoramento	61
Tabela 15 – Quantidade de lodo bruto e cal utilizada em cada batelada.....	63
Tabela 16 – Características do lodo bruto proveniente do digestor anaeróbico de lodo e desidratado em centrífuga para cada batelada	64
Tabela 17 – Médias das temperaturas obtidas nas primeiras 12 horas de experimento para cada batelada.....	68
Tabela 18 – Temperaturas ambiente registradas nos dias de experimento para cada batelada	68
Tabela 19 – Variação das concentrações de sólidos (totais e voláteis) de acordo com	

a dosagem de cal e tempo de mistura e armazenamento para cada batelada	74
Tabela 20 – Concentração de fósforo total do lodo bruto e caleado com 40% de cal	81
Tabela 21 – Concentração de compostos inorgânicos do lodo bruto e do lodo caleado com 40% de cal.....	82
Tabela 22 – Viabilidade de ovos viáveis de helminto por grama de ST para cada batelada	88
Tabela A1 – Temperatura do lodo bruto e da mistura lodo + cal durante o tempo de mistura dentro do reator para as bateladas com dosagem de cal de 20%.....	104
Tabela A2 – Temperatura do lodo bruto e da mistura lodo + cal durante o tempo de mistura dentro do reator para as bateladas com dosagem de cal de 30%.....	105
Tabela A3 – Temperatura do lodo bruto e da mistura lodo + cal durante o tempo de mistura dentro do reator para as bateladas com dosagem de cal de 40%.....	106
Tabela B1 – Variação de pH observada em cada uma das três bateladas para todas as dosagens de cal testadas	107
Tabela C1 – Concentração de NKT no decorrer do tempo para cada batelada	108
Tabela C2 – Concentração de N-Amoniacal no decorrer do tempo para cada batelada	109
Tabela C3 – Concentração de Nitrogênio orgânico no decorrer do tempo para cada batelada	110
Tabela D1 – Log NMP de coliformes totais de acordo com as dosagens de cal	111
Tabela D2 – Log NMP de coliformes termotolerantes (<i>E. coli</i>) de acordo com as dosagens de cal	112

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

APHA – *American Public Health Association*

ASTM - *American Society of Testing and Materials*

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DAFA – Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EAP – Estabilização Alcalina Prolongada

E. coli – *Escherichia coli*

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

IAP – Instituto Ambiental do Paraná

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

NH₃ – Gás Amônia

NKT – Nitrogênio Kjeldahl Total

NMP – Número Mais Provável

N/P – Relação Nitrogênio e Fósforo

PFRP – *Processes to Further Reduce Pathogens*

PR – Paraná

PROSAB – Programa de Pesquisas em Saneamento Básico

PSRP – *Processes to Significantly Reduce Pathogens*

PVC – Policloreto de Vinila

RAFA – Reator Anaeróbio de Fluxo de Ascendente

RALF – Reator Anaeróbio de Lodo Fluidizado

RAFAALL – Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente Através do Leito de Lodo

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná

SEMA – Secretaria do Meio Ambiente

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SST – Sólidos em Suspensão Totais

SSV – Sólidos em Suspensão Voláteis

ST – Sólidos Totais

STV – Sólidos Totais Voláteis

UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

UFF – Unidade Formadora de Foco

UFP – Unidade Formadora de Placa

USEPA – *United States Environmental Protection Agency*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GERAL.....	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO	21
3.1.1 Fases Do Tratamento De Esgoto	22
3.1.2 Fundamentos Do Tratamento Anaeróbio De Esgotos Sanitários	23
3.2 GERAÇÃO E COMPOSIÇÃO DE LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO	24
3.2.1 Riscos Microbiológicos	28
3.2.2 Metais Pesados	29
3.3 TRATAMENTOS DE LODOS	31
3.3.1 Estabilização De Lodos	32
3.3.2 Remoção De Umidade De Lodos	33
3.3.3 Higienização De Lodos.....	34
3.3.3.1 Mecanismos e processos de higienização	35
3.3.3.1.1 <i>Higienização via térmica</i>	35
3.3.3.1.2 <i>Higienização via química</i>	40
3.3.3.1.3 <i>Higienização via biológica</i>	42
3.3.3.1.4 <i>Higienização via radiação</i>	43
3.4 HIGIENIZAÇÃO DE LODOS POR ESTABILIZAÇÃO ALCALINA PROLONGADA (EAP) – CALEAÇÃO.....	44
3.5 DESTINAÇÃO DO LODO DE ESGOTO – USO AGRÍCOLA	49
3.6 CARACTERÍSTICA DO ÓXIDO DE CÁLCIO (CAL).....	54
4. MATERIAIS E MÉTODOS	56
4.1 LODO UTILIZADO NO EXPERIMENTO	56
4.2 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL.....	57
4.3 PROCESSO DE HIGIENIZAÇÃO	59
4.4 PARÂMETROS ANALISADOS	60
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
5.1 CARACTERÍSTICAS DO LODO BRUTO	63
5.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO LODO DURANTE O PROCESSO DE CALEAÇÃO ...	65

5.2.1 Temperatura.....	65
5.2.2 pH.....	70
5.2.3 Porcentagem De Sólidos (totais e voláteis).....	73
5.2.4 Teor De Umidade	76
5.2.5 Nitrogênio	77
5.2.6 Fósforo	81
5.2.7 Compostos inorgânicos	82
5.2.8 Pureza da cal virgem.....	83
5.3 PARÂMETROS MICROBIOLÓGICOS E PARASITOLÓGICOS.....	83
5.3.1 Coliformes Termotolerantes	83
5.3.2 Ovos De Helmintos	85
5.4 ASPECTOS TECNOLÓGICOS	90
6. CONCLUSÕES	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94
APÊNDICE A - RESULTADOS DE TEMPERATURA	104
APÊNDICE B - RESULTADOS DE PH	107
APÊNDICE C - RESULTADOS DE NKT E N-AMONACAL	108
APÊNDICE D - RESULTADOS DOS PARÂMETROS BACTERIOLÓGICOS	111

1. INTRODUÇÃO

As estações de tratamento de esgoto (ETEs) atualmente encontram problemas quanto à destinação a ser dada ao lodo gerado durante o tratamento. Isto porque o lodo acumula passivos ambientais e pode representar elevados custos operacionais nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), apesar de ser um subproduto rico em matéria orgânica e nutrientes.

Infelizmente o tratamento do lodo de esgoto ainda é uma realidade de poucos municípios do Brasil e estes resíduos, em geral, são direcionados a aterros e lixões ou são acumulados nas próprias ETEs.

Existem várias alternativas tecnicamente aceitáveis para a disposição final do lodo, como: reciclagem agrícola, incineração, destinação final em aterros sanitários exclusivos, *landfarming*, biomassa para geração de energia, misturas para materiais utilizados na construção civil, entre outras.

Dentre estas opções, a utilização agrícola do bio sólido tem sido considerada uma alternativa ambientalmente viável para o problema, além de apresentar interesse econômico, uma vez que esta técnica propõe uma maneira de transformar o resíduo em um produto de uso útil e sustentável devido à quantidade de matéria orgânica e de macro e micronutrientes presentes no lodo.

Entretanto, antes de se fazer uso da disposição agrícola como alternativa para o lodo de esgoto, é necessário realizar o condicionamento do mesmo por meio de operações como adensamento, estabilização, desaguamento, higienização e secagem. A aplicação destas operações varia de acordo com as características do lodo e com a destinação escolhida.

No Brasil, o uso agrícola do lodo de esgoto deve atender aos parâmetros de qualidade estabelecidos pela resolução CONAMA 375/06 (CONAMA, 2006), tornando o processo de higienização para redução de organismos patogênicos uma etapa essencial a ser cumprida.

Mecanismos térmicos e de radiação, assim como químicos e biológicos, podem ser empregados de forma isolada ou combinada para promover a higienização do lodo, de modo a reduzir os impactos ambientais que a aplicação do lodo no solo possa causar.

A estabilização alcalina é um dos processos de higienização de lodo de esgoto que apresenta simplicidade operacional e viabilidade para o tratamento de qualquer

quantidade de lodo. Usualmente utiliza-se cal (virgem ou hidratada) como agente alcalinizante em quantidades suficientes para aumentar o pH para 12, condição para garantir a inativação dos microrganismos patogênicos. Entretanto, para lodos já na fase sólida, a aplicação da cal virgem é a mais indicada devido a sua capacidade de reagir com a umidade e liberar calor. O processo de higienização por meio da adição de cal é conhecido por caleação, calagem ou EAP (Estabilização Alcalina Prolongada).

Os lodos de esgoto apresentam concentrações de nitrogênio que variam de 3 a 5%, assim uma vez que ocorre o aumento dos valores de pH devido a adição de cal, ocorre também a volatilização (*stripping*) da amônia gerada no processo.

Convencionalmente o processo de caleação é realizado ao ar livre, sem monitoramento frequente dos parâmetros e sem garantia de completa homogeneização. Buscando otimizar o processo, o presente trabalho propõe a utilização de um reator fechado, revestido externamente por manta térmica, e sistema de homogeneização mecânico para realizar a higienização alcalina de lodo de esgoto.

Uma vez que a amônia é um fator que auxilia no processo de redução de microrganismos patogênicos, a realização deste processo em um sistema confinado (reator fechado) permite que este agente de higienização fique em contato por mais tempo com a massa de lodo.

Sabe-se que uma perfeita homogeneização da massa de lodo com a cal, de modo que não existam “focos” de lodo sem cal ou com baixo pH, é de extrema importância e condição básica para se obter uma higienização adequada. Assim, o sistema de homogeneização tem a função de contribuir para a eficiência no processo de higienização, em consequência da movimentação da massa de lodo, que garante maior contato do mesmo com a cal e com a amônia formada, além de poder viabilizar a redução nas dosagens de cal e, conseqüentemente, dos custos com o produto químico.

Por fim, a manta térmica desempenha papel de isolante térmico a fim de evitar que a massa de lodo perca o calor absorvido pela reação exotérmica da cal com a umidade do lodo, mantendo-a em altas temperaturas por mais tempo.

Tendo em vista o exposto acima, o processo de higienização utilizando um reator fechado com sistema de homogeneização mecânico combina diversas variáveis, que agem simultaneamente para se obter a qualidade sanitária do bio sólido.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o processo de higienização alcalina de lodo de esgoto, após digestão anaeróbia, utilizando reator fechado com mistura mecânica, afim de estudar a otimização do processo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar, em termos biológicos (bactérias e ovos de helmintos) e físico-químicos, o lodo de esgoto de digestor anaeróbio coletado após processo de desague;
- Monitorar as características físico-químicas (temperatura, pH, umidade, sólidos totais e voláteis, NKT e N-amoniaco) do lodo de esgoto proveniente do digestor anaeróbio, submetido a diferentes dosagens de cal virgem, ao longo do tempo;
- Avaliar a influência do tempo de residência do lodo sob mistura, dentro do reator fechado, na redução de coliformes termotolerantes e de ovos viáveis de helmintos;
- Avaliar a redução de coliformes termotolerantes e de ovos viáveis de helmintos no lodo de esgoto proveniente do digestor anaeróbio, de acordo com a dosagem de cal virgem aplicada, ao longo do tempo até completar 45 dias de armazenamento;
- Avaliar os aspectos tecnológicos do uso de reator fechado no processo de higienização alcalina de lodo de esgoto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO

O esgoto sanitário que chega às estações de tratamento é constituído por esgoto doméstico, água de infiltração e pluvial e, eventualmente, certa quantidade de efluentes industriais, desde que este esteja dentro dos padrões sanitários para tratabilidade nas ETEs (ABNT, 1986).

O lançamento dos esgotos “*in natura*”, nos corpos hídricos, provoca interferência direta no ambiente aquático, afetando suas características físicas, químicas e biológicas. Esse impacto é causado, em parte, pelo incremento na disponibilidade de matéria orgânica, que causa o desequilíbrio das interações estabelecidas no ecossistema aquático. Por esta razão, um dos principais objetivos do tratamento das águas residuárias é remover a matéria orgânica presente (BATISTA, 2015).

Andrade Neto e Campos (1999) mencionam que a natureza tem condições de promover o “tratamento” dos esgotos. Entretanto, este fenômeno depende da capacidade de autodepuração do corpo receptor e da existência de boas condições ambientais que permitam a evolução, reprodução e crescimento de organismos que decompõem a matéria orgânica.

Assim, com o intuito de explorar esses organismos e reproduzir os fenômenos e processos observados na natureza, as tecnologias para tratamento de águas residuárias baseadas em processos biológicos se firmaram como os de maior interesse para o tratamento de esgoto sanitário devido à sua capacidade de remoção de DBO (BATISTA, 2015).

No tratamento de esgotos por processos biológicos, procura-se otimizar os processos que ocorrem na natureza, respeitando-se as restrições que se impõem pela proteção do corpo receptor e pelas limitações de recursos disponíveis. Essa otimização envolve redução do tempo de detenção hidráulica e aumento da eficiência das reações bioquímicas, de maneira que se atinja determinado nível de redução de carga orgânica, em tempo e espaço muito inferiores em relação ao que se espera que ocorra no ambiente natural (ANDRADE NETO; CAMPOS, 1999).

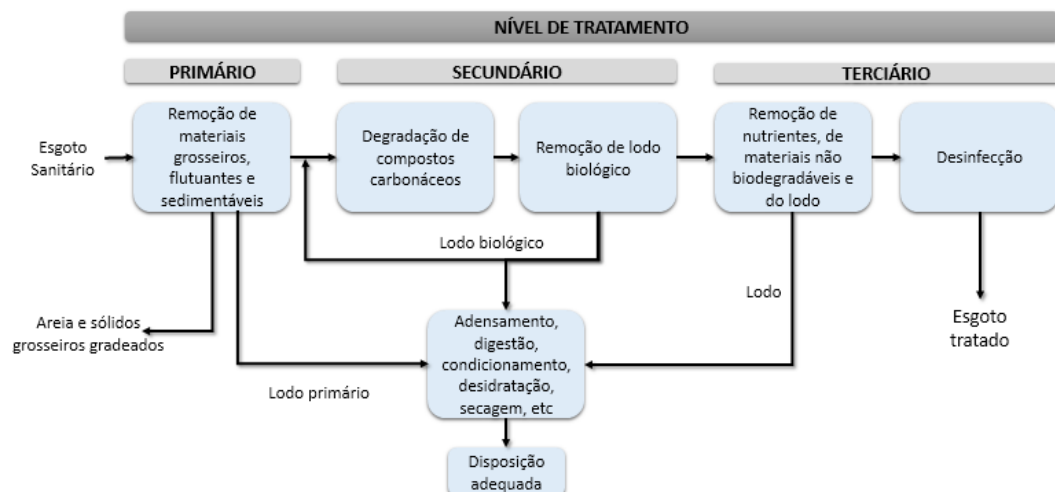
Existem duas vias básicas de biodegração: aeróbia e anaeróbia. Na biodegração aeróbia microrganismos aeróbios ou facultativos consomem a matéria

orgânica do esgoto na presença de oxigênio, enquanto que na biodegração anaeróbia o consumo da matéria orgânica acontece na ausência de oxigênio livre pelos microrganismos anaeróbios ou facultativos.

3.1.1 Fases Do Tratamento De Esgoto

O tratamento de esgoto sanitário pode abranger diferentes níveis, denominados tecnicamente de tratamento primário, secundário ou terciário. A Figura 1 mostra esquematicamente a composição de uma estação de tratamento completa convencional, até a higienização final.

Figura 1 – Níveis de tratamento de esgoto em uma estação de tratamento completa



Fonte: Adaptado de ANDRADE NETO e CAMPOS (1999)

Von Sperling (2005) expõe os mecanismos para remoção de poluentes de esgoto, separando-os em operações unitárias físicas (gradeamento, mistura, floculação, sedimentação, flotação, filtração), processos unitários químicos (remoção ou conversão de contaminantes pela adição de produtos químicos, por exemplo, precipitação, adsorção, desinfecção) e processos unitários biológicos em que a remoção de contaminantes ocorre por meio da atividade biológica (remoção de matéria orgânica carbonácea, nitrificação, desnitrificação).

A definição do tipo de tratamento de esgoto a ser implantado demanda estudos de alternativas de concepção do sistema de tratamento em função do nível de tratamento e da eficiência necessários (ROCHA, 2009). O nível de tratamento requerido depende das condições de autodepuração do corpo receptor e envolve,

principalmente, análises quanto à capacidade de oxigenação ao longo do curso de água. Características hidráulicas do corpo receptor e do efluente lançado também devem ser consideradas (NUNES, 2008).

3.1.2 Fundamentos Do Tratamento Anaeróbio De Esgotos Sanitários

O tratamento anaeróbio é um processo biológico no qual um consórcio de diferentes tipos de microrganismos, na ausência de oxigênio molecular, promove a transformação de compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídios) em produtos mais simples como metano e gás carbônico. Os microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia são muito especializados e cada grupo atua em reações específicas (FORESTI *et al.*, 1999).

De acordo com o mesmo autor, a maior aceitação de sistemas de tratamento anaeróbios se deve a dois fatores principais:

- Às vantagens inerentes ao processo de digestão anaeróbia em relação ao tratamento aeróbio, como: menor produção de lodo de excesso e por consequência uma economia considerável no manejo e destino final deste resíduo, possibilidade de recuperação e utilização do gás metano formado no processo como combustível e bom funcionamento mesmo após longos períodos de interrupção.
- À melhoria do desempenho deste tipo de sistema, conseguindo-se um aumento na velocidade de remoção de matéria orgânica e na porcentagem de material orgânico digerido.

Kato *et al.* (1999) mencionam que o reator UASB (*upflow anaerobic sludge blanket*) é o reator anaeróbio mais consagrado no mundo todo. No Brasil ele também pode ser denominado como RAFA, DAFA, RALF ou RAFAALL. Porém, para Chernicharo (2007) estas siglas são inconsistentes e, muitas vezes causam a denominação incorreta dos diferentes tipos de reatores de manta de lodo.

Esta configuração de reator anaeróbio não possui qualquer tipo de material de enchimento para servir de suporte para a biomassa. A imobilização dos microrganismos ocorre por meio de auto-adesão, formando flocos ou grânulos densos que ficam em suspensão e se dispõem em camadas de lodo a partir do fundo do reator (KATO *et al.*, 1999). Devido às condições impostas pelo sistema, fluxo hidráulico ascendente, os sólidos em suspensão ficam retidos no manto de lodo biológico

espesso (ROCHA, 2009), permitindo que o UASB desempenhe também o papel de digestão da parte sólida retida o que resulta em um lodo já bem estabilizado (KATO *et al.*, 1999).

O baixo custo operacional e de implantação, baixos requisitos de área, baixo consumo de energia e aplicabilidade em pequena e grande escala, juntamente com a possibilidade de serem operados com elevados tempos de retenção de sólidos e baixos TDHs (da ordem de 8 a 12 horas), atribuem ao sistema UASB características favoráveis para sua aplicação no tratamento de águas residuárias de origem doméstica (CHERNICHARO *et al.*, 1999).

3.2 GERAÇÃO E COMPOSIÇÃO DE LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

A expansão dos serviços de coleta e tratamento de esgotos sanitários no Brasil tem se refletido diretamente no aumento da produção de lodo, o que tem levado ao desenvolvimento de novas tecnologias para adequação destes, de modo a atender aos requisitos ambientais, de segurança e saúde pública que são cada vez mais restritivos (VAN HAANDEL; ALÉM SOBRINHO, 2006).

Por ser uma característica inerente dos processos de tratamento de esgoto, a produção de lodo de esgoto tende também a um crescimento no mínimo proporcional ao crescimento da população humana, dessa forma a disposição deste resíduo é uma providência que deve ser tratada com urgência (CONAMA, 2006).

Segundo Ferreira e Andreoli (1999), Van Haandel e Além Sobrinho (2006), areia, resíduos grosseiros e lodo constituem os sólidos extraídos por diversos métodos das estações de tratamento de esgoto, sendo o lodo o subproduto mais importante dos processos de tratamento. De acordo com tais autores, o lodo adquire posição de destaque não só por seu potencial de poluição e pelos grandes volumes gerados, que giram em torno de 90.000 à 350.000 toneladas de lodo líquido por dia no Brasil (VON SPERLING; ANDREOLI, 2014), mas também pela complexidade de seu tratamento e pelos custos advindos de seu manejo adequado.

Muito se utiliza o termo biossólido para os lodos de esgoto, porém existe uma pequena diferença entre estas duas definições. O termo “lodo de esgoto” é usado para definir os resíduos sólidos das estações de tratamento de esgoto ainda sem passar pelos processos de tratamento, recuperação e reciclagem, enquanto o termo biossólido é utilizado para os sólidos que, após adequação e tratamento, em qualquer

forma, tem como destino o uso útil (SPINOSA, 2007).

Geralmente o termo “lodo” é usado em conjunto com um adjetivo que descreve de qual processo de tratamento o lodo tem origem, tal como lodo primário, lodo de excesso de lodo ativado e outros processos de tratamento, principalmente, de aeróbios (METCALF & EDDY, 2003).

A quantidade e as características dos lodos produzidos em estações de tratamento de esgotos, conforme citado por Batista (2015), são definidas, dentre outros fatores, pela qualidade do esgoto afluente, pela alternativa de tratamento adotada e pela eficiência operacional do sistema.

A geração do lodo nos sistemas de tratamento de esgoto ocorre, essencialmente, por causa da remoção da matéria orgânica presente (LOZER, 2012). Por serem naturais e conseqüentemente mais baratos e confiáveis, quase invariavelmente esta remoção é feita por meio de processos biológicos (VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001). Quando as bactérias usam o material orgânico como fonte de carbono e energia, parte deste é transformado em massa celular (VAN HAANDEL; ALEM SOBRINHO, 2006).

Segundo Van Haandel e Cavalcanti (2001), em sistemas de tratamento anaeróbio, o lodo é constituído de três frações. Além da massa celular gerada a partir do metabolismo do material orgânico, o lodo ainda apresenta uma fração inerte, que tem sua origem na floculação de material orgânico não biodegradável e particulado, e o substrato particulado ou material orgânico biodegradável não hidrolizado.

Usualmente a biomassa anaeróbia, que cresce e se multiplica às custas de matéria orgânica, fica retida um longo tempo no reator, permitindo que ocorra a digestão anaeróbia do próprio material celular. Dessa forma não existe a necessidade de uma etapa posterior de digestão, apesar de algumas estações de tratamento de esgoto possuírem ainda um digestor de lodo após o tratamento anaeróbio (VON SPERLING; GONÇALVES, 2014).

Diversos pesquisadores apresentaram resultados obtidos, em escala piloto ou escala real, da produção de lodo biológico anaeróbio em reatores de manta de lodo tratando esgoto sanitário (AISSE *et al.*, 1999). Estes resultados são apresentados na Tabela 1. Na maioria das etapas e processos utilizados para o tratamento de esgoto sanitário, o lodo gerado apresenta umidade elevada. Assim, apenas por convenção, o lodo é designado por fase sólida, afim de distingui-lo do fluxo do líquido que está sendo tratado (METCALF & EDDY, 2003).

Tabela 1 – Produção de lodo biológico anaeróbio em reatores tipo UASB tratando esgoto sanitário

Referência	Produção (gSTS/(hab.dia))	Teor de sólidos (g/L)	Teor de água (%)	Produção (l/(hab.dia))
Haskoning	10 – 20	50 a 100	90 a 95	0,20
Vieira & Souza	22	72	93	0,31
Haskoning <i>et al.</i>	15	60 a 80	93	0,21
Van Haandel & Lettinga	16	50 a 75	93	0,26

Fonte: AISSE *et al.* (1999)

Dependendo do processo de tratamento biológico utilizado, a concentração de matéria orgânica no lodo varia de 40 a 70% (PIRES, 2003; NASCIMENTO *et al.*, 2001), mas uma parte desta é não biodegradável ou de difícil biodegradação. Essa matéria orgânica pode ser expressa em termos da concentração de sólidos em mg/L, teor de sólidos secos em percentagem, ou representada pela relação sólidos voláteis/sólidos totais, em %SV/ST (BATISTA, 2015).

Em sistemas biológicos de tratamento de esgoto, seja aeróbio ou anaeróbio, existe uma massa de microrganismos responsável pela degradação ou estabilização da matéria orgânica. Normalmente as bactérias estão presentes em maior quantidade, mas outros tipos de microrganismos (vírus, protozoários, rotíferos e ciliados) também podem ser encontrados (VAN HAANDEL; ALÉM SOBRINHO, 2006).

Dessa forma, o lodo gerado em sistemas de tratamento de águas residuárias, particularmente sistemas de tratamento de esgoto sanitário, pode exibir três aspectos indesejáveis:

- Instabilidade biológica: normalmente uma parte do lodo gerado se compõe de material biodegradável e se esta fração for alta, o lodo se torna putrescível;
- Qualidade higiênica sanitária péssima: presença de uma grande variedade de vírus, bactérias e parasitas (protozoários e helmintos) que constituem uma ameaça para a saúde pública;
- Grande volume: a concentração de sólidos em suspensão é relativamente baixa porém seu volume é elevado devido à umidade, sendo necessário aplicar um processo de separação de fases para reduzir o teor de água.

A composição típica do lodo bruto e digerido, de acordo com Metcalf & Eddy (2003) é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição típica do lodo primário bruto e digerido e do lodo de excesso de lodos ativados bruto

Item	Lodo primário bruto		Lodo primário digerido		Lodo de excesso bruto de lodos ativados
	Faixa	Típico	Faixa	Típico	
pH	5,0 - 8,0	6,0	6,5 – 7,5	7,0	6,5 – 8,0
Alcalinidade (mg/L em CaCO ₃)	500 – 1500	600	2500 – 3000	3000	580 - 1100
Ácidos orgânicos (mg/L em HAc)	200 – 2000	500	100 – 600	200	1100 – 1700
Sólidos totais (%ST)	5 - 9	6	2 - 5	4	0,8 – 1,2
Sólidos voláteis (%STV)	60 – 80	65	30 – 60	40	59 – 88
Graxas e gorduras solúveis em éter (%ST)	6 – 30	-	5 – 20	18	-
Proteínas (%ST)	20 – 30	25	15 – 20	18	32 – 41
Nitrogênio (N, %ST)	1,5 – 4,0	2,5	1,6 – 6,0	3,0	2,4 – 5,0
Fósforo (P ₂ O ₅ , %ST)	0,8 – 2,8	1,6	1,5 – 4,0	2,5	2,8 – 11
Potássio (K ₂ O, %ST)	0,0 – 1,0	0,4	0,0 – 3,0	1,0	0,5 – 0,7
Celulose (%ST)	8 – 15	10	8 – 15	10	-
Ferro (exceto na forma de sulfeto)	2,0 – 4,0	2,5	3,0 – 8,0	4,0	-
Sílica (SiO ₂ , %ST)	15 – 20	-	10 – 20	-	-

Fonte: Metcalf & Eddy (2003)

Os componentes das águas residuárias, ao passarem pelo sistema de tratamento, concentram-se em proporções variáveis no lodo. Alguns destes componentes, orgânicos ou minerais, conferem características fertilizantes ao lodo. Entretanto, outros componentes são indesejáveis devido ao seu risco sanitário e ambiental (SILVA *et al.*, 2014).

De uma maneira geral, agrupa-se os contaminantes em metais pesados, poluentes orgânicos variados e microrganismos patogênicos. Contudo, a presença dos mesmos é variável pois está ligada às características do esgoto bruto e do sistema de tratamento. Por isso, o esgoto produzido por uma população saudável conterà menos patógenos, da mesma forma que um esgoto predominantemente doméstico apresentará baixas concentrações de metais pesados (VON SPERLIN, 2005).

3.2.1 Riscos Microbiológicos

Normalmente, nos sistemas de tratamento de esgoto, os microrganismos ficam adsorvidos às partículas sólidas e tendem a precipitar durante a fase de decantação, concentrando-se no lodo de esgoto. No entanto, a densidade de patógenos presentes no lodo é variável, pois está ligada às características da comunidade e ao tipo de tratamento a que o lodo foi submetido. Os organismos patogênicos, normalmente presentes no esgoto sanitário, e por consequência no lodo de esgoto, podem ser divididos em: fungos, vírus, protozoários, bactérias e parasitas (FERNANDES; SILVA, 1999).

Coliformes termotolerantes são indicadores do estado sanitário do lodo de esgoto. Considerando que o grupo de coliformes totais incluem gêneros que não são de origem exclusivamente fecal, os coliformes termotolerantes são os mais utilizados para mensurar a qualidade sanitária do lodo, sendo que a bactéria *Escherichia coli* é a principal representante deste grupo pois tem origem exclusivamente fecal (GREGHI, 2005; LIMA *et al.*, 2001).

No que se refere ao aspecto parasitológico, a quantificação de ovos de helmintos são os principais indicadores sanitários para o reaproveitamento de lodo. Batista (2015) menciona que a avaliação da presença destes parasitas no lodo é de extrema importância, pois são os patógenos mais resistentes a uma ampla variedade de condições físicas e químicas adversas e são capazes de sobreviver por vários anos no solo, enquanto que os demais patógenos (bactérias, vírus e protozoários) sobrevivem na escala de dias e meses. Além disso, este grupo apresenta baixa dose infectante para o hospedeiro, ou seja, um único ovo é capaz de infectar uma pessoa.

Tal avaliação não deve ser apenas quantitativa, uma vez que a viabilidade dos ovos de helmintos adquire grande relevância do ponto de vista epidemiológico. Como exemplo, os ovos fertilizados de *Ascaris lumbricoides* que são eliminados pelas fezes do hospedeiro não são infecciosos até que se transformem, dentro do ovo, em larvas de segundo estágio. Somente esses ovos, ao serem ingeridos por um novo hospedeiro, liberam suas larvas no intestino delgado e continuam o ciclo normal para formar parasitas adultos. Essa capacidade infectiva pode permanecer latente durante anos se as condições ambientais forem adequadas (ANDREOLI *et al.*, 2001).

Na Tabela 3 estão dispostos os principais agentes patogênicos presentes no lodo de esgoto.

Tabela 3 – Principais agentes patogênicos presentes no lodo de esgoto

ORGANISMO	
Bactérias	Protozoários
<i>Salmonella</i> sp	<i>Cryptosporidium</i> sp
<i>Shigella</i> sp	<i>Entamoeba histolytica</i>
<i>Vibrio cholarea</i>	<i>Giardia lamblia</i>
<i>Campylobacter jejuni</i>	<i>Balantidium coli</i>
<i>Escherichia coli</i>	<i>Toxoplasma gondii</i>
Vírus	Helmintos
Vírus da Hepatite A	<i>Ascaris lumbricoides</i>
Rotavírus	<i>Trichuris trichiura</i>
Reovírus	<i>Toxocara canis</i>
Astrovírus	<i>Taenia</i> sp
Calicivírus	<i>Hymenolepis nana</i>

Fonte: FERNANDES; SILVA (1999)

3.2.2 Metais Pesados

Além dos riscos microbiológicos associados ao lodo de esgoto, outro fator que limita a aplicação de lodos na agricultura e que deve ser monitorado, é a possível presença de metais pesados.

O lodo das estações de tratamento que recebem apenas efluentes domésticos contém pequena quantidade de metais pesados, provenientes da própria natureza dos resíduos e das canalizações. Entretanto, além dos níveis naturais, podem ocorrer lançamentos clandestinos de pequenas fontes de contaminação de metais pesados, tais como: laboratórios fotográficos, fábricas de baterias, tintas, cromagens, que adicionam um determinado nível de metais na rede (FERREIRA; ANDREOLI, 1999; FERNANDES; SILVA, 1999).

Segundo Peirano (2003 apud TONANI, 2008), os metais de maior interesse em termos de saúde pública e que podem ser encontrados nos esgotos sanitários e por consequência no lodo são: cádmio, cromo, cobre, níquel, chumbo, ferro, cobalto, manganês, magnésio, mercúrio, selênio e zinco. Teores de metais pesados em lodo de diferentes sistemas de tratamento de esgoto no Brasil são apresentados nas Tabelas 4.

Tabela 4 – Teores de metais pesados em lodo de diferentes sistemas de tratamento de esgoto no Brasil

Localidade	Parâmetros (mg/kg)										
	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
Jerônimo Monteiro – ES ⁽¹⁾	-	-	0,4	15	129	4,1	-	9,4	40	-	320
Suzano – SP ⁽²⁾	-	-	8,0	579	625	-	-	346	217	-	1,1
RMC – PR ⁽³⁾	0,2	138	0,3	48	101	0,1	0,4	30	32	8,0	343
Barueri – SP ⁽⁴⁾	12	-	18	-	850	2,0	13,0	34	189	1,0	1870
Franca – SP ⁽⁵⁾	-	307	3,3	285	573	-	2,8	57	77	-	1028

Fonte: apud BITTENCOURT (2014)

Quando adicionados ao solo em concentrações elevadas, estes metais são capazes de prejudicar as propriedades químicas e biológicas dos solos e provocar toxidez às plantas e animais (ILHENFELD; PEGORINI; ANDREOLI, 1999). A Tabela 5 apresenta os limites máximos de metais pesados no lodo de esgoto definido pelas principais normas brasileiras

Tabela 5 – Limites máximos de metais pesados aceitos no lodo de esgoto pelas principais normas brasileiras

Elemento	Concentração máxima permitida (mg/kg ST)		
	CETESB P4.230 (1999)	CONAMA 375 (2006)	SEMA/PR 021 (2009)
Arsênio	75	41	41
Bário	NE*	1.300	1.300
Cádmio	85	39	20
Chumbo	840	300	300
Cobre	4.300	1.500	1.000
Cromo	NE*	1.000	1.000
Mercúrio	57	17	16
Molibdênio	75	50	50
Níquel	420	420	420
Selênio	100	100	100
Zinco	7.500	2.800	2.500

*NE = Não Especificado

Fonte: OGAWA (2014)

3.3 TRATAMENTOS DE LODOS

Como já mencionado, o gerenciamento do lodo de esgoto gerado pelas estações de tratamento de esgoto é uma atividade complexa e que envolve elevados custos, o que pode comprometer os benefícios ambientais e sanitários esperados destes sistemas caso o gerenciamento não seja bem executado.

De acordo com Von Sperling e Gonçalves (2014), as principais etapas do gerenciamento do lodo são adensamento, estabilização, condicionamento, desaguamento, higienização e disposição final. No entanto, a incorporação de cada uma destas etapas no fluxograma de processamento do resíduo sólido de ETE depende das características do lodo gerado, dos processos de tratamento de esgotos utilizados e dos métodos de disposição final, possibilitando diversas combinações de operações e processos unitários.

A Tabela 6 discrimina as etapas do gerenciamento do lodo biológico usualmente adotadas para os sistemas de tratamento de esgotos mais frequentemente utilizados.

Tabela 6 – Etapas usuais do processamento do lodo biológico nos sistemas de tratamento de esgoto mais utilizados

Sistema de tratamento	Processamento usual de lodo			
	Adensamento	Digestão	Desidratação	Disposição final
UASB	-	-	X	X
Filtro biológico (baixa carga)	X	-	X	X
Filtro biológico (alta carga)	X	X	X	X
Biofiltro aerado submerso	X	X	X	X
Lodos ativados convencional	X	X	X	X
Lodos ativados de aeração prolongada	X	-	X	X
Lagoa anaeróbia	-	-	Opcional	X
UASB + biofiltro aerado submerso	-	-	X ⁽¹⁾	X ⁽¹⁾
UASB + filtro anaeróbio	-	-	X	X
UASB + filtro biológico de alta carga	-	-	X ⁽¹⁾	X ⁽¹⁾

⁽¹⁾Pressupõe retorno do lodo aeróbio excedente para o UASB, onde sofre adensamento e digestão.
Fonte: VON SPERLING; GONÇALVES (2014)

Conforme o lodo passa pelas diversas etapas do tratamento, suas características vão se alterando. As principais mudanças são na etapa de adensamento, onde ocorre o aumento da concentração de sólidos totais (sólidos secos) e redução do volume de lodo, e na etapa de digestão, onde há a redução da carga de sólidos em suspensão voláteis (VON SPERLING; GONÇALVES, 2014).

3.3.1 Estabilização De Lodos

O lodo de esgoto em seu estado natural (lodo bruto) é rico em organismos patogênicos, facilmente putrescível e rapidamente desenvolve maus odores. Afim de resolver esta questão e estabilizar a fração biodegradável da matéria orgânica utiliza-se os processo de estabilização. Estes processos, segundo Ludovice (2014) podem ser divididos em:

- Estabilização biológica: utiliza bactérias específicas (anaeróbias ou aeróbias) para promover a estabilização da fração biodegradável da matéria orgânica;
- Estabilização química: estabilização atingida mediante a oxidação química da matéria orgânica devido a adição de produtos químicos;
- Estabilização térmica: obtida a partir da ação do calor sobre a fração volátil em recipientes hermeticamente fechados.

O período de permanência do lodo na unidade de tratamento biológico de esgoto influencia em suas características, especialmente na estabilidade, conseqüentemente, na forma de tratamento desse resíduo sólido (VON SPERLING; GONÇALVES, 2014). Segundo os autores, a relação entre sólidos voláteis totais (SVT) e sólidos totais (ST) do lodo representa a fração orgânica dos ST e o nível de digestão do lodo (estabilidade).

Em lodos digeridos, a relação SVT/ST situa-se em torno de 0,6 a 0,65, enquanto em lodos não digeridos está entre 0,75 e 0,80. Os lodos que permanecem dentro das unidades biológicas por meses apresentam-se mais digeridos e adensados. O lodo produzido em reatores anaeróbios, a exemplo do UASB, é estabilizado no próprio reator durante um período médio de 1 a 3 meses. Os lodos gerados nas lagoas facultativas, anaeróbias e de maturação usualmente são bem estabilizados, permanecendo nestes sistemas por períodos superiores a 2 anos (LUDUVICE, 2014).

3.3.2 Remoção De Umidade De Lodos

Von Sperling e Gonçalves (2014) afirmam que os lodos primários e secundários gerados nos processos de tratamento de esgotos, com exceção das lagoas, contêm de 0,5 a 6% em peso de ST, após saírem dos decantadores. Este excesso de umidade dificulta e torna onerosa a disposição do lodo em áreas agrícolas, principalmente em relação aos custos de transporte. Assim, é de fundamental importância a utilização de processos que visem a redução do conteúdo de água dos mesmos.

No fluxo de lodo em uma estação de tratamento de esgoto, poderá haver duas etapas de remoção de umidade: adensamento (ou espessamento) e desaguamento (ou desidratação). Segundo Gonçalves, Ludovice e Von Sperling (2014) o adensamento é mais utilizado para lodos de tratamento primário, de lodos ativados e de filtros biológicos percoladores, e tem importantes implicações no dimensionamento e na operação dos digestores. Já o desaguamento, segundo os mesmos autores, é realizado com o lodo digerido e tem impacto importante nos custos de transporte e destino final do lodo.

Conforme mencionado pelos autores, para o adensamento de lodo, normalmente são empregados adensadores por gravidade ou flutadores por ar dissolvido, enquanto que para o desaguamento de lodo emprega-se leitos de secagem, centrífugas, filtros a vácuo, prensas desaguadoras ou filtros prensa.

Com o intuito de aumentar a aptidão ao desaguamento e a captura de sólidos, costuma-se submeter os lodos a uma etapa de condicionamento prévio à etapa de desaguamento. Usualmente, este condicionamento é realizado através do emprego de produtos químicos (coagulantes), dentre os quais o mais comum é a adição de polímero afim de favorecer a agregação das partículas de sólidos e a formação de flocos (GONÇALVES; LUDUVICE; VON SPERLING, 2014).

Considerando-se a grande diversidade de processos unitários de tratamento de lodo, Pulkow e Aisse (1996), mencionados por Aisse *et al.* (1999), citam inicialmente os processos de secagem natural ao ar livre no que se refere a etapa de desidratação do lodo, dando destaque aos leitos de secagem convencionais. No entanto, este processo exige área nem sempre disponível e por isso são utilizados equipamentos mecanizados como filtros prensa e centrífugas.

3.3.3 Higienização De Lodos

Um dos constituintes mais preocupantes dos lodos de esgoto são os microrganismos patogênicos (bactérias, vírus, protozoários e parasitas intestinais). Destes, uma parcela significativa são causadores de doenças. A concentração de patógenos no lodo de esgoto é inversamente proporcional às condições sanitárias da comunidade atendida pela rede, portanto, quanto maior o nível e ocorrências de doenças de veiculação hídrica na comunidade, maior cuidado sanitário é necessário, principalmente quando a rota de disposição utilizada é a reciclagem agrícola (PINTO, 2014).

A sanidade do lodo, caracterizada pela ausência dos agentes patogênicos mencionados, é realizada por métodos de higienização, que devem ser econômicos, seguros e de fácil aplicação prática (ANDREOLI *et al.*, 2001).

Pinto (2014) diz que os processos de estabilização e tratamento, como a digestão anaeróbia ou aeróbia, podem reduzir consideravelmente os níveis de patogenicidade do lodo. Entretanto, muitos ovos de parasitas intestinais são pouco afetados pelos processos de digestão convencional, necessitando uma etapa complementar ou conjugada aos processos convencionais para sua completa inativação. Esta etapa é denominada higienização e busca reduzir a patogenicidade do lodo a níveis que não venham a causar riscos à saúde da população, de acordo com as exigências para cada utilização.

Caso a destinação final do lodo de esgoto tratado seja a aplicação na agricultura ou em parques e jardins de acesso público, o autor explica que o lodo requer um nível maior de exigência sanitária do que outras alternativas de disposição, como aterros sanitários ou reutilização em matrizes de concreto (PINTO, 2014).

A normativa brasileira CONAMA 375 (CONAMA, 2006), baseada na normativa da USEPA (2003), relaciona uma série de tecnologias de processamento de lodo de esgoto com o objetivo de promover o tratamento do mesmo quanto aos aspectos sanitários para que possa ser utilizado para fins agrícolas. Os processos envolvidos combinam mecanismos térmicos, químicos e/ou biológicos que, se operados de maneira adequada, produzem biossólidos com concentrações de bactérias, enterovírus e ovos viáveis de helmintos em níveis praticamente nulos, podendo ser dispostos de maneira irrestrita (USEPA, 2003; PINTO, 2014).

Entre os diversos agentes capazes de promover a higienização do lodo, três

fatores se destacam como os mais indicados: temperatura, pH e radiação solar. Estes agentes de higienização apresentam faixas nas quais os organismos se mantêm presentes e/ou em desenvolvimento no lodo e, uma vez que tais faixas são ultrapassadas, os organismos são inativados. Dessa forma, o que determina a eficiência da higienização, é a intensidade e o tempo em que estes agentes são impostos à massa de lodo de esgoto (ANDREOLI *et al.*, 2001).

3.3.3.1 Mecanismos e processos de higienização

A USEPA (2003) define os processo de higienização como PFRP – *Processes to Further Reduce Pathogens* ou Processos para redução adicional de patogênicos e PSRP – *Processes to Significantly Reduce Pathogens* ou Processos para significativa redução de patógenos. De acordo com Pinto (2014), existe um certo consenso entre os diversos países quanto às tecnologias que conseguem produzir um lodo sanitariamente seguro para aplicação irrestrita na agricultura. Entretanto, as variáveis de controle de processo não são iguais para todos, o que traduz, de alguma forma, a grande variabilidade das condições ambientais e das características do lodo produzido em cada país.

3.3.3.1.1 Higienização via térmica

De acordo com Pinto (2014) o mecanismo de redução de microrganismos patogênicos, através da via térmica combina, duas variáveis de controle que agem em conjunto para atingir a qualidade microbiológica exigida, o tempo e a temperatura.

Baseada em extensa pesquisa conduzida para correlacionar a redução de vários agentes patogênicos em lodos de esgoto, com diferentes graus de tratamento térmico, a USEPA (2003) propõe quatro diferentes regimes de tempo-temperatura. A Tabela 7 indica as propostas de regime tempo-temperatura, considerando o percentual de sólido, que reduzem os organismos patogênicos a níveis abaixo do detectável.

Tabela 7 – Regimes tempo-temperatura para lodos Classe A propostos pela USEPA

REGIME	APLICAÇÃO	REGIME TEMPO-TEMPERATURA
1	Lodo com no mínimo 7% de sólidos (exceto aqueles cobertos pelo regime 2)	Temperatura do lodo deve ser maior que 50°C por no mínimo 20 minutos
2	Lodo com no mínimo 7% de sólidos, na forma de torta e aquecida por contato com gás quente ou líquido imiscível	Temperatura do lodo deve ser maior que 50°C, por no mínimo 15 segundos
3	Lodo com menos de 7% de sólidos	Temperatura do lodo deve ser maior que 50°C por no mínimo 15 segundos mas menos que 30 minutos.
4	Lodo com menos de 7% de sólidos cujos requisitos de tratamento sejam menos rigorosos	Temperatura do lodo deve ser maior que 50°C por mais de 30 minutos.

Fonte: USEPA (2003)

Barés *et al.* (2011) realizaram um estudo para a higienização de lodo de esgoto misto (60% lodo primário e 40% lodo aeróbio de lodo ativado), para aplicação na agricultura de acordo com as especificações da Resolução CONAMA 375/06. Os autores avaliaram a relação tempo x temperatura para remoção de patógenos (*Salmonella* spp, coliformes termotolerantes e ovos de helmintos) por hidrólise térmica em termohidrolisador. Na pesquisa foram estudados tempos de 30, 60 e 90 minutos com temperaturas de aquecimento de 50°C, 60°C e 70°C. Os resultados mais representativos foram obtidos para a combinação de 60°C a 60 minutos, com valores de 0,25 ovo/g de ST para helmintos e 10^1 a 10^3 NMP/g de ST para coliformes termotolerantes. *Salmonella* spp não foi identificada em nenhuma amostra (bruto e tratado). Assim, os autores concluíram que o tratamento proposto foi eficiente, atingindo as exigências da legislação vigente e, por isso, o lodo apresentou características que possibilitaram seu enquadramento como lodo Classe A.

Godinho (2003) realizou tratamento térmico em lodo de reator UASB *in natura* (não submetidos à etapa de desaguamento), observando total inativação de ovos de *A. lumbricoides* para tempos de aquecimento da ordem de 4 a 5 horas e temperaturas máximas próximas à 70°C.

A compostagem é um processo aeróbio de decomposição da matéria orgânica no qual as condições de temperatura, umidade, oxigênio e nutrientes são rigorosamente monitoradas. A inativação dos microrganismos patogênicos ocorre principalmente através da via térmica, ocasionada pelo aumento de temperatura na fase de maior atividade do processo (PINTO, 2014). A faixa de temperatura atingida neste processo varia de 40°C à 65°C e pode durar por até 30 dias. O produto resultante deste processo é um material estável e livre de patógenos, tendo grande valor agrônômico como condicionador de solos (PIANA, 2009).

De acordo com Pinto (2014), tanto lodo bruto quanto lodo digerido podem ser compostados. Materiais como cavacos de madeira, folhas, resíduos verdes, palha de arroz, serragem ou outros agentes estruturantes precisam ser adicionados ao lodo para melhor reter a umidade, aumentar a porosidade e equilibrar a relação entre o carbono e o nitrogênio.

CUKJATI *et al.* (2012) estudaram a compostagem de lodo anaeróbio, proveniente de digestor mesófilo tratando lodo primário, secundário e terciário de esgoto municipal, e concluíram que é um processo economicamente viável na gestão sustentável de lodo de esgoto. Os autores utilizaram como materiais estruturantes misturas de serragem, lascas de madeira e casca de árvore em diferentes proporções e não houve inoculação e adição de nutrientes para o início da compostagem. Cinco experimentos em escala piloto foram realizados pelos pesquisadores, sendo que três foram realizados com aeração forçada e em dois a aeração foi conseguida por meio do revolvimento das leiras. Com o objetivo de minimizar a quantidade de material estruturante, a pesquisa foi realizada com uma proporção maior de lodo em relação ao material estruturante, diferente de outras pesquisas neste campo que usam quantidades de lodo menores do que a quantidade de material de estrutura. Em todos os casos estudados a temperatura termofílica foi atingida e portanto o processo de compostagem se mostrou satisfatório, confirmando que o uso de maiores volumes de lodo do que de material estruturante produz resultados comparáveis aos de pesquisas com proporções convencionais. A qualidade do lodo compostado indicou que ele pode ser usado como cobertura ou suplemento do solo em áreas degradadas, porém não possui qualidade para a produção de alimentos devido ao teor elevado de cádmio, mercúrio e zinco encontrado.

Ogawa (2014) estudou a higienização de compostos de lodo de esgoto associado à resíduos agroindustriais e urbanos (bagaço de cana, poda de árvore,

cama de frango e aparas de grama) em 5 tratamentos, sendo: (1) lodo + bagaço de cana; (2) lodo + bagaço de cana + poda de árvore; (3) lodo + bagaço de cana + aparas de grama; (4) lodo + bagaço de cana + cama de frango; (5) lodo + bagaço de cana + poda de árvore + aparas de grama. O processo de compostagem foi realizado de maneira estática durante 280 dias. A autora constatou a ausência de coliformes termotolerantes a partir de 98 dias no tratamento 4; 126 no tratamento 1; 196 nos tratamentos 3 e 5; 210 no tratamento 2. Em todos os tratamentos houve inviabilização dos ovos de helmintos. Em relação aos parâmetros físico-químicos mensurados após a compostagem, todos os compostos de lodo de esgoto expressaram valores conforme exigidos pela legislação quanto à matéria orgânica, carbono, nitrogênio e metais pesados, distinguindo-se quanto aos teores de macro e micronutrientes. Os tratamentos T1 e T4 apresentaram alta toxicidade quando submetidos à testes de germinação, porém os níveis das substâncias tóxicas nestes tratamentos não foram estudados.

Szabová, Juris e Papajová (2010) estudaram a influência da compostagem aeróbia de resíduos orgânicos em relação a sobrevivência de ovos de *Ascaris suum* em duas estações do ano, inverno e verão. A leira de compostagem era composta por resíduos orgânicos vegetais crus da produção agrícola (palha, madeira, serragem), resíduos adicionais gerados na fabricação de cerveja e lodo de esgoto. No interior desta leira foram inoculados 2.000 ovos de helminto e, em cada estação, a mesma foi mecanicamente aerada. Apesar das baixas temperaturas do ambiente no inverno, os resultados obtidos revelaram a indução de temperatura máxima do substrato (65°C) em 6 dias de compostagem, permanecendo na faixa termofílica até o 36º dia de experimento. Durante o experimento no verão, foi observada maior temperatura do substrato, atingindo 71°C. Segundo os autores, devido a elevada temperatura e às mudanças químicas que o substrato sofreu durante a compostagem a desvitalização total dos ovos de *A. suum* foi observada entre o 4º e 5º dia de experimento no inverno e no 6º dia no verão, permitindo a conclusão de que lodo compostado é higienicamente seguro e adequado para fins agrícolas sem risco de transmissão de patógenos para o ambiente.

A técnica de secagem térmica para secagem e higienização de lodo tem sido praticada por diversos países há muitos anos. Porém as tecnologias mais antigas, embora efetivas, careciam de um melhor balanço energético. Atualmente, o

desenvolvimento de equipamentos de secagem mais eficientes, agregados às pressões ambientais para a disposição segura dos biossólidos, trouxeram novamente esta tecnologia à discussão (PINTO, 2014).

O tratamento, de acordo com Pinto (2014) consiste em passar o lodo por uma fonte de calor, de modo a provocar a evaporação da umidade existente no lodo, conseqüentemente, alcançar a inativação térmica dos microrganismos. Este processo pode ser realizado em secadores de contato direto (onde o ar quente fica em contato direto com o lodo, arrastando a umidade, gases e poeira) ou em secadores de contato indireto (onde o calor é transmitido por placas de troca térmica).

Outra forma de higienização de acordo com o autor é a pasteurização, cujo processo envolve o aquecimento do lodo a 70°C por 30 minutos, seguido de uma rápida refrigeração a 4°C. Tal aquecimento pode ser feito através de trocadores de calor ou por injeção de vapor aquecido, sendo este último o mais utilizado (USEPA, 2003).

Passamani, Keller e Gonçalves (2002) efetuaram estudos em laboratório e mostraram que o processo de pasteurização é capaz de reduzir em 100% a viabilidade dos ovos de helmintos e coliformes fecais em lodos provenientes de reator UASB, independente da concentração de sólidos. Porém, eles reportaram a emissão de compostos odorantes após o tratamento.

A digestão anaeróbia termofílica de lodo é um processo promissor para direcionar o resíduo para um uso benéfico, pois é capaz de propiciar a redução de patógenos no lodo de maneira menos dispendiosa quando comparado à outros processos que envolvem elevação de temperatura. Porém uma questão importante deste processo é a temperatura necessária e o tempo de espera para conseguir um determinado grau de inativação patogênica (POPAT *et al.*, 2010).

Pinto (2014) cita o processo de digestão aeróbia autotérmica como um processo de higienização que segue os mesmos princípios do sistema convencional de digestão aeróbia, com a diferença de operar em fase termófila, devido a alterações na concepção e na operação do sistema.

O autor diz que neste processo, o lodo é geralmente pré-adensado e opera com dois estágios aeróbios, sem a necessidade de introdução de energia para elevação da temperatura. Como o volume de reação é menor, o sistema é fechado e a concentração de sólidos no lodo é mais alta, o calor liberado das reações aeróbias aquece o lodo, levando-o a temperaturas superiores a 50°C no primeiro estágio e 60°C

no segundo.

Devido ao aumento da temperatura, este processo atinge maiores taxas de redução de sólidos orgânicos quando comparado ao processo de digestão aeróbia convencional, podendo alcançar 70% de remoção de SSV em um tempo relativamente curto. A USEPA (2003) orienta que microrganismos patogênicos são seguramente reduzidos a valores inferiores aos limites de detecção se o lodo for mantido a uma temperatura entre 55-60°C por 10 dias.

Um sistema de digestão aeróbia autotérmica opera basicamente com os reatores em semibatelada diária, respeitando o tempo de retenção definido no projeto. Este regime operacional é considerado um importante fator para se assegurar uma efetiva destruição dos microrganismos patogênicos, em que a eficiência de mistura e aeração são os dois aspectos essenciais para o sucesso operacional, principalmente pelas dificuldades existentes de se transferir oxigênio para lodos com concentração de sólidos tão altas (4 a 6% de ST). Assim, a localização dos aeradores, a geometria dos reatores e as condições de turbulência são aspectos importantes para serem analisados durante o projeto (PINTO, 2014).

Afim de melhor estabelecer a relação tempo de retenção e temperatura, Popat *et al.* (2010) determinaram a cinética de inativação de *Ascaris suum* (indicador de ovos de helmintos) e PVS-1 (polivírus - indicador de vírus entéricos) durante a digestão anaeróbia termofílica de lodo primário digerido e avaliaram o efeito da temperatura na cinética de inativação. A cinética da inativação foi avaliada nas temperaturas 51,1°C, 53,3°C, e 55,5°C e as amostras foram coletadas no tempo zero; 0,5h; 1h; 1,5h; 2h; 4 ou 12h; 8 ou 16h, de acordo com o tempo de residência nos digestores. Como esperado, os autores observaram que a inativação foi mais rápida quanto mais elevada era a temperatura e concluíram que, independente da temperatura utilizada, a inativação praticamente total ocorreu dentro de 2h de tratamento.

3.3.3.1.2 Higienização via química

Usualmente, o mecanismo de higienização de lodos via química utiliza um produto alcalinizante, que tem o papel de elevar o pH do lodo, de maneira que a natureza coloidal do protoplasma celular dos microrganismos patogênicos seja alterada de forma letal, e produzir um ambiente inóspito para sua sobrevivência (PINTO,2014).

Dependendo do produto utilizado, o aumento do pH pode ser acompanhado pela elevação de temperatura, permitindo uma condição mais efetiva para a inativação dos microrganismos patogênicos e um período menos exigente para a relação tempo-temperatura que a via térmica isoladamente.

As condições requeridas para se obter um lodo sanitariamente seguro por via química, segundo a USEPA (2003) são:

- Elevação do pH do lodo para valores superiores a 12 por no mínimo 72 horas (3 dias);
- Manter a temperatura do lodo superior a 52°C por no mínimo 12 horas;
- Secar o ambiente até se atingir a concentração de sólidos de 50% após o período de elevação do pH.

Sobre a utilização da estabilização química como processo de redução significativa de patógenos, a norma brasileira descreve que este tipo de tratamento é aceito mediante adição de quantidade suficiente de álcali para que o pH seja elevado até pelo menos 12 por um período mínimo de 2 horas, permanecendo acima de 11,5 por mais 22 horas (CONAMA, 2006).

Ainda sobre a higienização via química, estudos prévios determinaram que o gás amônia tem propriedades ovicidas para patógenos, incluindo ovos de *Ascaris*. McKinley, Parzen e Guzmán (2012) realizaram uma pesquisa com o intuito de buscar a inativação de *Ascaris* via gás amônia (NH₃), em condições ambientais comumente encontradas em banheiros ecológicos e utilizando materiais facilmente disponíveis em um cenário de saneamento, como adubo (fezes e serragem), urina e cinzas. Os autores verificaram inativação mais rápida no experimento com adubo misturado com urina armazenada e cinzas, com significativa inativação observada após duas semanas e inativação de 99% em oito semanas. Para o adubo misturado com urina fresca e cinzas, a inativação de 99% foi alcançada com 15 semanas. A inativação mais rápida utilizando a matriz urina armazenada + cinza pode ser atribuída à elevada concentração inicial de NH₃ nesta matriz (2.466 mg-N/L) e sua manutenção durante o experimento (2.213 mg-N/L após 12 semanas).

Barros, Costa e Andreoli (2006) avaliaram a desinfecção de lodo de esgoto proveniente de reator anaeróbio tipo RALF (Reator Anaeróbio de Lodo Fluidizado) através do tratamento alternativo empregando ácidos orgânicos, como ácido acético e peracéticos. Em todos os tratamentos utilizando ácido peracético foi alcançado valores superiores a 99,99% de inativação de coliformes totais e fecais

(termotolerantes). A utilização da concentração de 230 mg/L de ácido resultou em uma concentração final de coliformes inferior à 2×10^2 NMP/100 mL. Nas doses de 460 mg/L e 920 mg/L essa concentração final foi inferior a 10 NMP/100 mL. O mesmo resultado foi obtido para o tratamento com ácido acético na concentração de 11.000 mg/L, apresentando 99,99% de eficiência na destruição dos microrganismos. Em relação à inviabilização de ovos de helmintos, os autores relataram que os tratamentos com ácidos orgânicos apresentaram eficiências inferiores quando comparados ao tratamento convencional de caleação, estando na faixa de 66,39% a 88,08%. Eles relataram ainda que, dentre os dois ácidos, o ácido peracético se mostrou mais eficiente que o ácido acético na inviabilização de ovos de helmintos.

Abreu *et al.* (2003) avaliaram a hidrólise química na remoção de ovos de helmintos e coliformes fecais em lodo anaeróbio proveniente de reator UASB e lodo aeróbio proveniente de biofiltro aerado submerso. Os lodos foram submetidos à agitação constante (150 rpm) durante 6 horas, temperatura ambiente (25°C) e diferentes concentrações de NaOH e H₂SO₄. Os autores constataram que a hidrólise alcalina foi mais eficiente na remoção de coliformes fecais (termotolerantes) do lodo anaeróbio, ao passo que no lodo aeróbio a hidrólise ácida foi a responsável pela redução destes microrganismos. No que se referiu à remoção de ovos de helmintos (totais e viáveis), os autores observaram que o tratamento ácido foi menos eficiente que o tratamento alcalino, com eficiências máximas de 61% (lodo aeróbio) e 62% (lodo anaeróbio) para o tratamento ácido e 93% (lodo aeróbio) para o tratamento alcalino.

3.3.3.1.3 Higienização via biológica

A inativação de microrganismos patogênicos do lodo de esgotos de forma biológica ainda carece de maiores experiências e dados mais consistentes, que permitam garantir condições de reprodutividade e aceitação científica.

Uma das alternativas mais conhecidas é a vermicultura, um processo no qual resíduos orgânicos são ingeridos por uma variedade de minhocas detritívoras e depois excretados, produzindo um húmus de fácil assimilação pelos vegetais e de grande valor agrônômico. Ao ingerir a matéria orgânica, as minhocas estariam ingerindo também microrganismos patogênicos presentes no lodo e inativando-os pela sua atividade gástrica (PINTO, 2014).

Entretanto, o autor ainda diz que a presença de gases, como a amônia, gás

sulfídrico e gás carbônico torna o lodo tóxico para as minhocas acarretando a morte desses invertebrados.

Dionísio e Ressetti (1997) avaliaram a capacidade de desinfecção e desinfestação de lodo de esgoto da minhoca *E. fetida*. Os autores realizaram a caleação do lodo (aeróbio e anaeróbio) com CaO, na dosagem de 50% do peso seco, seguida de compostagem. O composto foi então submetido à vermicompostagem. O composto, apesar de ter sido caleado e compostado, ainda apresentava concentração de helmintos na faixa de 95 à 190 ovos viáveis/g MS. Os autores verificaram que após a vermicompostagem houve uma redução de 100% das formas parasitárias. Nesta situação, provavelmente, a *E. fetida* adquiriu a função de hospedeiro.

Corrêa, Fonseca e Corrêa (2007) estudaram a produção de biossólido isento de patógenos por meio da vermicompostagem do lodo de esgoto misturados à serragem e podas de árvores e de gramas (fonte de carbono e material estruturante) e inoculado com minhocas. Os autores observaram o bom desenvolvimento das minhocas no composto e o melhoramento das características físicas e sanitárias do biossólido compostado proporcionado pelo processo. O lodo de esgoto apresentava, originalmente, 4,7 ovos viáveis de helmintos por grama de matéria seca e após a vermicompostagem não foram detectados ovos viáveis de helmintos, permitindo aos autores concluir que o processo foi capaz de produzir biossólidos livres de helmintos, portanto em condições de ser direcionado para o uso agrícola no Brasil.

3.3.3.1.4 Higienização via radiação

Pinto (2014) menciona que, por sua ação nas estruturas coloidais celulares dos microrganismos, os raios beta e gama podem ser usados para alcançar a inativação dos mesmos.

Segundo o autor, raios beta são formados através de aceleradores de elétrons em campo elétrico da ordem de 1 milhão de volts. Sua efetividade em reduzir patogênicos depende da dosagem de radiação que é aplicada ao lodo. Esta radiação tem pouco poder de penetração no lodo e, portanto, precisa ser introduzida passando por uma fina camada de lodo líquido para ser efetiva. Já os raios gama são fótons produzidos por elementos radioativos como o cobalto-60 e o césio-137. Esses raios são capazes de penetrar facilmente no lodo e por conseguinte a tecnologia pode ser utilizada em lodo líquido em tubulações ou em esteiras transportadoras, no caso de

lodo desidratado, que tenham contato com a fonte radioativa.

Da mesma maneira, a radiação solar, ou mais especificamente os raios ultravioletas, são conhecidos pelo seu poder bactericida. Muitos pesquisadores reportam condições de inativação de microrganismos patogênicos quando o lodo é exposto à radiação solar. Entretanto, pouca informação consistente existe sobre este assunto, bem como de sua capacidade real de, sozinho, alcançar níveis de redução de patógenos menores que os limites de detecção (PINTO, 2014).

Mun *et al.* (2009) estudaram o efeito da radiação de micro-ondas na inativação de ovos de *A. lumbricoides* inoculados no solo em comparação aos processos de irradiação ultravioleta e exposição ao ozônio. Para as amostras de solo, com 14% de teor de água, expostas a radiação de micro-ondas (700W, 2.450MHz) por períodos que variaram de zero a 70s, os autores verificaram que houve inativação de aproximadamente 99,7% de ovos em 60 segundos. Entretanto, as amostras de solo com igual concentração de ovos quando submetida à radiação UV monocromática de aproximadamente 253,7 nm (intensidade de 3 mW cm⁻²), com e sem agitação, atingiram inativação negligenciável dos ovos (2,3% e 52,1% respectivamente) mesmo após 60 minutos de exposição. Em relação ao tratamento por ozônio, o mesmo não indicou êxito na inativação de ovos, apresentando baixa inativação (aproximadamente 26%) quando a amostra foi submetida por 30 minutos a uma dose 5,8 ±0,7 mg/l de ozônio dissolvido. Assim, os autores concluíram que o tratamento com micro-ondas foi efetivo na inativação de ovos de *A. lumbricoides* em solo e esclarecem que a rápida inativação correlacionou positivamente com o aumento de temperatura depois do tratamento.

3.4 HIGIENIZAÇÃO DE LODOS POR ESTABILIZAÇÃO ALCALINA PROLONGADA (EAP) – CALEAÇÃO

De acordo com Andreoli e Pinto (2001), a higienização de lodos por meio de produtos alcalinos associada à existência de solos predominantemente ácidos na maioria das regiões brasileiras, permite agregar valor ao biossólido produzido, podendo substituir total ou parcialmente o uso de corretivos agrícolas.

A *American Society for Testing and Materials* fornece, em seu guia padrão para estabilização alcalina de resíduos de estações de tratamento de efluentes, orientação para uso de materiais alcalinos reativos para o tratamento de sólidos que resultam do tratamento de águas residuárias com o intuito de reduzir os níveis de patógenos e

alcançar a conformidade com os requisitos regulamentares. Deve-se promover uma mistura perfeita entre o lodo e o reagente de estabilização afim de garantir distribuição uniforme de pH e redução de patógenos em toda a massa de sólido (ASTM, 2006).

A estabilização alcalina mais difundida é a caleação, processo que consiste na mistura de cal, virgem ou hidratada, ao lodo. Neste processo, segundo Andreoli *et al.* (2001), três fatores irão interferir no processo de higienização: inicialmente a alteração da temperatura, a mudança de pH da massa resultante e, finalmente, a ação da amônia que será formada a partir do nitrogênio do lodo em condições de temperatura e pH elevados. Estas reações que ocorrem durante o processo, geram um sólido com características química, biológica e fisicamente estável, com baixo potencial para exalar odores, reduzida quantidade de organismos patogênicos e metais pesados, eventualmente presentes, com sua mobilidade reduzida.

Além disso, segundo Andreoli *et al.* (2001), características químicas e físicas do lodo também são alteradas na caleação, por meio de reações de hidrólises, saponificações, neutralização de ácidos, entre outras. Algumas dessas alterações são:

- Redução dos sólidos voláteis (10-35%), devido à perda de orgânicos voláteis para a atmosfera;
- Aumento dos sólidos totais, resultantes da adição de sólidos da cal e da precipitação de sólidos dissolvidos;
- Redução nos níveis de fósforo solúvel devido à reação com ortofosfato para formar precipitado de fosfato de cálcio.

A USEPA (2003) e o CONAMA (2006) preconizam que a inertização do lodo pela adição de cal envolve a adição de quantidades suficientes de cal para alcançar ou ultrapassar e manter o pH em pelo menos 12 por, no mínimo, duas horas.

Quando adequadamente operado, um sistema de caleação para lodo de esgoto deve ser capaz de, além dos pontos já mencionados como reduzir odores, eliminar/reduzir patógenos e melhorar as características de desaguamento, ainda reduzir valores de nitrogênio, pela volatilização da amônia, e aumentar a alcalinidade total (ANDREOLI *et al.*, 2001).

As condições de pH alto, temperatura elevada e umidade reduzida por um período de tempo prolongado permitem uma variação menos rigorosa no regime de tempo-temperatura do que as exigências para tratamento térmico (USEPA, 2003).

Polprasert e Valencia (1981) realizaram estudo afim de avaliar a eficiência de

inativação de coliformes fecais, chamados nos dias de hoje de coliformes termotolerantes, e ovos de *Ascaris* em fezes utilizando cal, considerado pelos autores um dos desinfetantes mais baratos. A pesquisa consistiu em avaliar a relação entre dosagem de cal, tempo de contato e a inativação dos microrganismos estudados. Os experimentos foram conduzidos em batelada, sendo testadas 4 concentrações de lama de cal (5.700, 9.500, 13.300 e 19.000 mg CaO/L) para 100 ml de amostras de fezes. Tais concentrações de cal foram dosadas afim de se obter amostras com pH próximos à 9, 10, 11 e 12, respectivamente. As misturas cal-fezes foram completamente homogeneizadas com vara de bambu estéril por cerca de 2 minutos e depois cobertas com papel alumínio para evitar contaminação. Análise de pH, coliformes fecais e densidade de ovos de helmintos foram realizadas para tempos de contato de 3, 6, 12, 18, 24 e 48h, sendo realizada a mistura completa da amostra em cada amostragem. Os resultados apresentados pelos autores mostraram que uma inativação da ordem 5 de magnitude poderia ser conseguida com 19g de CaO/L (pH=12) e 3 horas de contato enquanto que uma redução insignificante de bactérias coliformes termotolerantes foi obtida para 5,7 g CaO/L (pH = 9) com tempo de contato de até 48h. Isto permite concluir que a cal, se aplicada em quantidades suficientes, pode ser efetiva na inativação de coliformes termotolerantes através da ação ovicida dos altos teores de pH. Contudo, em relação à inativação de ovos de *Ascaris*, os autores obtiveram uma redução de apenas 26,5% de ovos na amostra tratada com maiores concentrações de CaO (19 g CaO/L) e de menos de 10% na menor dosagem (5,7 g CaO/L), ambos no maior tempo de contato (48h), sugerindo que a cal apresenta pouco efeito sobre ovos de *Ascaris*.

Eriksen, Andreasen e Ilsoe (1995) examinaram a sobrevivência e desenvolvimento de ovos de *Ascaris suum* em lodo de esgoto desaguado (20% de matéria seca) e caleado (dosagem de 10% peso/peso de cal virgem). Este processo resultou em um aumento de temperatura da massa de lodo para 45°C, devido à reação do CaO com a água, e pH acima de 12. A mistura de lodo foi mantida em recipiente de plástico fechado com tampa durante 5 meses, com retirada de amostras a cada duas semanas durante um período de 10 semanas e novamente ao final do 5º mês. Os resultados mostraram que o tratamento proposto inibe completamente o embrionamento de ovos de *A. suum* em lodo e indica que o armazenamento por mais de 10 semanas com pH acima de 12 tem um efeito irreversível na capacidade dos ovos de desenvolver a fase infecciosa quando o meio retorna ao pH neutro. Por isso

a técnica pode ser utilizada como medida higiênica antes da aplicação de lodos em terras agrícolas.

Soccol *et al.* (1997) estudaram os efeitos da caleação sobre a viabilidade de ovos de helmintos em amostras de lodo de esgoto digerido aerobiamente, cujo teor de matéria seca foi de 6,72% e 5,89%, e tratados com cal na concentração de 50%. O pH no dia zero (início da caleação) foi de 12,5 e manteve-se nesta faixa nos primeiros 30 dias. Este tratamento promoveu redução na viabilidade de ovos de helmintos de 86 a 100% dependendo do pH atingido no momento da adição da cal e do teor de matéria seca inicial. Estes autores afirmam que, para obter maior percentual de redução de ovos de helmintos, o teor de matéria seca inicial do lodo deve ser superior a 20%.

Mader Netto *et al.* (2003) avaliaram as variações nos níveis de pH do lodo caleado em função das doses de CaO (10%, 20%, 30%, 40% e 50%), do teor de umidade do lodo (28% ST, 38% ST, 45% ST e 69% ST) e do tempo de reação (dia zero, 1h, 2h; 8h; 1 dia; 3 dias; 5 dias; 7 dias; 10 dias; 15 dias; 20 dias; 30 dias; 45 dias e 60 dias). O lodo de esgoto testado pelos autores era proveniente de reator anaeróbio de lodo fluidizado e era parcialmente desidratado em leito de secagem com auxílio de processo térmico artificial. A mistura lodo-cal foi realizada manualmente. A partir dos valores médios, os autores verificaram que as maiores dosagens de CaO (40 e 50% MS) mantiveram os níveis de pH elevados por um período maior de tempo. Foi observado ainda que os tratamentos com maior e menor teor de sólido foram estatisticamente iguais, levando os autores a concluir que a umidade não é um fator relevante como condicionador dos níveis de pH e sugerir que é possível realizar caleação em lodos com grau de desidratação elevados. Considerando o tempo de reação da CaO, os maiores níveis de pH foram observados na primeira hora após a adição do agente alcalinizante, embora não diferente estatisticamente da segunda e oitava hora. Os tratamentos com maiores dosagem de cal permaneceram por aproximadamente 20 dias com valores de pH acima de 11. Os autores consideraram também que independentemente da dosagem de CaO utilizada e do teor de sólidos presente no lodo, o processo de restabelecimento do equilíbrio do pH somente teve início após 24 horas da caleação.

Godinho (2003) caracterizou lodos anaeróbios higienizados por caleação quanto à presença e viabilidade de ovos de helmintos (*Ascaris* sp). Para o experimento, utilizou-se lodo de reator UASB em escala piloto coletado após etapa de

desaguamento em leito de secagem. Foram testadas três dosagens de cal hidratada (30, 40 e 50%). Os resultados do autor indicam que a caleação foi 100% eficiente na inviabilização de *Ascaris sp* após 30 dias de contato, para as três dosagens estudadas.

Barros, Costa e Andreoli (2006), estudando a desinfecção de lodo de esgoto proveniente de reator anaeróbio tipo RALF através do tratamento convencional por caleação, obtiveram biossólido com concentração de coliformes totais e fecais (termotolerantes) menores que 200 NMP/100 mL, valores muito abaixo do limite de restrição para uso. Sobre a inativação de helmintos, a caleação efetuada a 30% em relação a massa seca de lodo e período de contato lodo-cal de 120 dias foi o que se mostrou ser o tratamento de higienização de lodo de esgoto mais eficiente, com 100% de inviabilização dos ovos.

Almeida *et al.* (2006) realizaram um trabalho afim de avaliar a eficiência de processos químicos e térmicos na redução de patógenos em lodo de esgoto doméstico, visando a reciclagem agrícola. Os autores estudaram lodo de esgoto, coletado no leito de secagem da estação de tratamento, submetidos ao processo de caleação com cal virgem 25% em relação ao peso seco e processo térmico em autoclave.

No que diz respeito ao controle de coliformes, o estudo mostrou que o tratamento químico foi eficiente na redução do NMP de coliformes termotolerantes e totais resultando em um lodo que se enquadra na Classe A da USEPA e da Cetesb e ainda na faixa aceitável no Estado do Paraná mesmo utilizando metade da quantidade de alcalinizante normalmente empregada. No entanto, o tratamento térmico praticamente esterilizou o lodo, reduzindo o NMP dos coliformes até o limite mínimo de detecção (ALMEIDA *et al.*, 2006).

Referente ao controle de ovos de helmintos, nos experimentos de Almeida *et al.* (2006) nenhum tratamento estudado apresentou ovos viáveis, inclusive o lodo bruto. No entanto, os autores explicam que tal fato pode ter ocorrido em partes pela eficiência moderada da digestão anaeróbia e também pelo período prolongado pelo qual o lodo de estudo permaneceu no leito de secagem (60 dias).

Maya *et al.* (2010), apud Bastos (2012), avaliaram a eficiência de diferentes fatores combinados na inativação de helmintos presentes no lodo de esgoto. Para realizar o experimento, foram selecionados ovos de *A. lumbricoides*, *A. suum*, *Toxocara canis*, *Trichuris trichiura*, *H. nana* e *Taenia solium*, por terem sido

encontrados em lodo de diferentes países. Para avaliar os efeitos combinados de temperatura, umidade e tempo de exposição, 210 ovos desses helmintos (35 ovos de cada gênero) foram inoculados em amostras de lodo, com umidade de 95, 90 e 80%, submetidas a temperaturas que variaram de 30 a 80°C e tempo de exposição 30, 60, 120 e 180 minutos. Os autores observaram que nas condições de 70°C, umidade de 80% e tempo de exposição de 120 minutos todos os ovos foram inativados. Nessas condições a temperatura decompõe a membrana vitelina que protege o ovo, deixando-o vulnerável. Para verificar a eficiência de cal associado à umidade foram adicionados 15% e 20% de cal em amostras de lodo com umidade de 90% e 80%. As amostras foram coletadas a partir de 0,5h até 10 meses de armazenamento, em temperaturas entre 22-25°C e umidade 60-90%. Com relação à adição de cal, verificaram que adição de 20% de cal aumentou o pH para 12,5, contribuindo com a inativação dos ovos quando expostos por 4 meses em umidade de 80%. Verificou-se ainda que *Ascaris* sp foi o helminto mais resistente, já os helmintos *T. canis* e *T. solium*, *T. trichiura* e *H. nana* foram os mais sensíveis aos tratamentos empregados.

3.5 DESTINAÇÃO DO LODO DE ESGOTO – USO AGRÍCOLA

O uso agrícola é uma destinação ambientalmente sustentável para o lodo de esgoto, pois promove a reciclagem de nutrientes, sendo benéfico ao cultivo de plantas e às características físico-químicas e biológicas do solo (BITTENCOURT, 2014). Além disso, a matéria orgânica presente no lodo favorece a formação de agregados, facilitando a penetração de raízes e a vida microbiana no solo, além de atuar junto à resistência do solo à erosão por estabilizar sua estrutura e aumentar a capacidade de retenção de água (PIRES, 2003).

O cenário mundial no que se refere à disposição de lodo de esgoto na agricultura é o mais variado. Alguns países já possuem políticas e normas muito bem definidas e estabelecidas quanto à aplicação do lodo para cultivo (UN-HABITAT, 2008 apud BASTOS, 2012), tornando esta uma alternativa bem consolidada. No entanto, no Brasil, estas normas estão limitadas a poucos estados, devido, entre outros fatores, à dificuldade de atendimento aos critérios e procedimentos estabelecidos pela Resolução CONAMA 375/06, como por exemplo a dificuldade em se realizar análises para determinação de vírus. O Paraná é um dos estados onde o lodo de esgoto tem a agricultura como destinação final prioritária (BITTENCOURT, 2014).

Quando comparada à outras alternativas de disposição final, como aterros sanitários, a aplicação de lodo para fins agrícolas requer uma logística substancialmente mais complexa que envolve: monitoramento do material, seleção de áreas, transporte e aplicação do material, elaboração de projetos agrônômicos, registros detalhados que permitam o rastreamento dos lotes aplicados, entre outros. Esta logística é bastante diferenciada daquela empregada pelas companhias de saneamento na rotina operacional de estações de tratamento de esgotos sanitários (SAMPAIO, 2013).

Segundo o mesmo autor, estima-se que a quantidade atual de lodo utilizada para fins agrícolas no Brasil seja da ordem de 21.000 toneladas (base seca) por mês. Desse valor, sua quase totalidade é produzida em estações de tratamento biológicos aeróbios, seja lodos ativados convencional, de aeração prolongada ou lagoas aeradas. A Tabela 8 indica a quantidade de lodo que é utilizados para fins agrícolas no Brasil, em algumas cidades ou estados.

Tabela 8 – Quantidades de lodo utilizadas para fins agrícolas no Brasil

Local	Quantidade ton/ano	Teor de sólidos %	Quantidade ton ST/ano
Distrito Federal	24.966	15,0	3.745
Franca – SP	16.400	27,5	4.510
Jundiaí – SP	21.900	18,0	3.942
Santa Maria – RS	4.745	20,0	949
Paraná	26.400	30,0	7.920
Total	94.411		21.066

Fonte: SAMPAIO (2013)

Até o ano de 2006, a estrutura normativa e legal referente à aplicação agrícola de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários limitava-se à norma técnica da Companhia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB, a P4.230/99, e à instrução técnica do Instituto Ambiental do Paraná – IAP, a CEP/DTA n. 001/02. Em 2006, o CONAMA estabeleceu a Resolução CONAMA 375/06, na qual definiu em âmbito Federal, critérios e procedimentos para o uso agrícola do lodo de esgotos gerados em estações de tratamento, constituindo assim elemento fundamental e indispensável para a promoção e regulamentação desta prática no território nacional (SAMPAIO, 2013).

Segundo Bittencourt (2014), a complexidade da legislação brasileira para uso agrícola de lodo de esgoto tem dificultado a gestão do processo e, conseqüentemente, vem contribuindo para a pouca difusão de uma prática mundialmente consolidada. Dessa forma, alguns aspectos dessa regulamentação necessitam ser melhor discutidos e eventualmente alterados, complementados e ajustados, de modo a permitir que a mesma atenda efetivamente os objetivos propostos (SAMPAIO, 2013).

Além disso, a falta de investimentos, de infraestrutura e de capacitação técnica também contribuem para a limitada adesão do uso agrícola de lodo pelas empresas de saneamento brasileiras (BITTENCOURT, 2014).

A resolução 375/06 do CONAMA determinada que os lodos gerados em sistemas de tratamento de esgoto deverão ser submetidos a processo de redução de patógenos e da atratividade de vetores para serem aplicados na agricultura. Baseado no que preconiza a USEPA, a norma brasileira estabelece diversos processos e critérios para redução significativa de patógenos (necessários para a obtenção de lodos de esgoto ou produto derivado tipo B), redução adicional de patógenos (necessários para a obtenção de lodos de esgoto ou produto derivado tipo A) e da atratividade de vetores.

No que se refere ao processo de estabilização alcalina, a resolução estabelece que para haver redução significativa de patógenos (lodo classe B) deve-se adicionar quantidade suficiente de cal (agente alcalinizante) para que o pH seja elevado até pelo menos 12, por um período mínimo de duas horas. Porém, a norma não define a estabilização alcalina como processo de redução adicional de patógenos para produzir lodo classe A (CONAMA, 2006).

A norma brasileira CONAMA (2006) prevê quais as culturas que são aptas a receberem lodo de esgoto ou produto derivado. É proibida a utilização de qualquer classe de lodo de esgoto ou produto derivado em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes, culturas inundadas e demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo. Lodo enquadrado como classe A pode ser utilizado para quaisquer culturas, respeitadas às exceções mencionadas anteriormente, enquanto lodo enquadrado como classe B é restrita ao cultivo de café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos.

Além disso, não é permitida a aplicação de lodo ou produto derivado em unidades de conservação; áreas de preservação permanente (APP); áreas de preservação de mananciais (APMs); áreas de captação de água para abastecimento

público; interior de zonas de transporte para fontes de águas minerais, balneários e estâncias de águas minerais e potáveis; entre outros.

A Tabela 9 mostra a classificação de lodo de esgoto ou produto derivado no que se refere aos indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos de acordo com a referida resolução.

Tabela 9 – Classes de lodo de esgoto ou produto derivado no que se refere aos indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos

Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado	Concentração de patógenos
A	Coliformes termotolerantes < 10 ³ NMP/g ST Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo/g ST <i>Salmonella</i> ausência em 10g de ST Vírus < 0,25 UFP ou UFF/g ST
B	Coliformes termotolerantes < 10 ⁶ NMP/g ST Ovos viáveis de helmintos < 10 ovos/g ST

ST- sólidos totais; NMP - número mais provável; UFF – Unidade formadora de foco; UFP – Unidade formadora de placa

Fonte: CONAMA (2006)

Além disso, de acordo com o Art. 7º da resolução CONAMA 375/06, a caracterização do lodo de esgoto ou produto derivado a ser aplicado no solo deve incluir o potencial agronômico, substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas e estabilidade da matéria orgânica.

O potencial agronômico do lodo de esgoto ou produto derivado é definido com base nos seguintes parâmetros: carbono orgânico; fósforo total; nitrogênio Kjeldahl; nitrogênio amoniacal; nitrito e nitrato; pH em água; potássio total; sódio total; enxofre total; cálcio total; magnésio total; umidade e sólidos voláteis e totais (CONAMA, 2006).

Para a caracterização química do lodo de esgoto ou produto derivado quanto à presença de substâncias orgânicas e inorgânicas, deverão ser determinadas e quantificadas as substâncias apresentadas nas Tabelas 10 e 11 respectivamente.

Tabela 10 – Substâncias orgânicas potencialmente tóxicas a serem determinadas no lodo de esgoto ou produto derivado

SUBSTÂNCIAS	
Benzenos clorados	Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos
1,2-Diclorobenzeno	Benzo(a)antraceno
1,3-Diclorobenzeno	Benzo(a)pireno
1,4-Diclorobenzeno	Benzo(k)fluoranteno
1,2,3-Triclorobenzeno	Indeno(1,2,3-c,d)pireno
1,2,4-Triclorobenzeno	Naftaleno
1,3,5-Triclorobenzeno	Fenantreno
1,2,3,4 -Tetraclorobenzeno	Lindano
1,2,4,5 -Tetraclorobenzeno	-
1,2,3,5 -Tetraclorobenzeno	-
Esteres de ftalatos	Fenóis clorados
Di-n-butil ftalato	2,4 – Diclorofenol
Di (2-etilhexil) ftalato (DEHP)	2,4,6 – Triclorofenol
Dimetil ftalato	Pentaclorofenol
Poluentes Orgânicos Persistentes (POP´s)	
Aldrin	DDT
Dieldrin	Toxafeno
Clordano	Mirex
Heptacloro	Hexaclorobenzeno
PCB´s	Dioxinas e furanos
Fenóis não clorados	
Cresóis	

Fonte: CONAMA (2006)

Tabela 11 – Concentração máxima permitida de substâncias inorgânicas em lodos de esgoto

Substâncias inorgânicas	Concentração máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado (mg/kg, base seca)
Arsênio	41
Bário	1.300
Cádmio	39
Chumbo	300
Cobre	1.500
Cromo	1.000
Mercúrio	17
Molibdênio	50
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2.800

Fonte: CONAMA (2006)

3.6 CARACTERÍSTICA DO ÓXIDO DE CÁLCIO (CAL)

A principal matéria-prima da cal é a pedra calcária, composta por calcita (CaCO_3) ou por dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), e também por um percentual de impurezas tais como, sílica, argila, fosfato, gipso, óxido de ferro e alumínio, sulfetos, entre outras (MATTANA, 2013).

A similaridade entre as propriedades físicas dos minerais carbonatados resulta numa dificuldade na distinção entre eles. Na classificação mineralógica das rochas calcárias, deve ser considerada a variação nas proporções de calcita, dolomita e demais componentes não carbonatados. Para tanto, são utilizados recursos adicionais de identificação, além da análise das propriedades físicas, como análises químicas, difração de raios X e microscopia eletrônica (SAMPAIO; ALMEIDA, 2005).

A cal virgem obtida a partir de rochas carbonatadas puras é um produto inorgânico de coloração branca. Caso a cal apresente coloração creme, amarelada ou levemente cinza, é um indicativo da presença de impurezas (SOARES, 2007).

Guimarães (1998) classifica a cal virgem de acordo com o teor de óxido de cálcio predominante, conforme mostrado na Tabela 12.

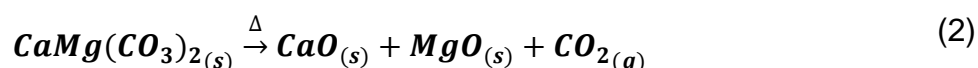
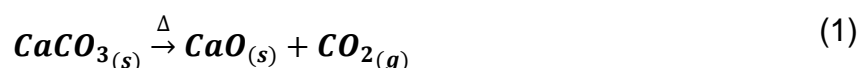
Tabela 12 – Classificação da cal quanto ao teor de CaO

Tipo	Teor de CaO (%)
Cal virgem cálcica	> 90
Cal virgem magnesiana	65 – 90
Cal virgem dolomítica	58 - 65

Fonte: GUIMARÃES (1998)

Assim, a qualidade comercial da cal virgem está diretamente relacionada ao tipo de rocha calcária utilizada em sua produção e a presença de impurezas. Uma diminuição na porcentagem de CaO livre infere, por consequência, a redução na reatividade da cal (SOARES, 2007).

A cal é obtida através da calcinação da rocha calcária, seja cálcica ou dolomítica. Entende-se por calcinação a transformação, por efeitos térmicos, do carbonato em óxido (SAMPAIO; ALMEIDA, 2005). Esta decomposição térmica resulta na formação de dois produtos: a cal e dióxido de carbono. Quando quimicamente bem estabelecida em relação às massas moleculares, a calcinação é reversível para ambos os carbonatos de cálcio e de magnésio (SOARES, 2007). A reação de formação da cal é descrita nas Equações (1) e (2).



O contato do óxido de cal com água provoca uma reação chamada extinção. A cal virgem cálcica, por ser originada de calcários puros (com elevados teores de CaO), apresenta extinção violenta, com grande liberação de calor, podendo atingir temperaturas da ordem de 400° em tanques fechados. Enquanto que a cal virgem magnesiana e dolomítica, por serem resultado da calcinação de calcário com teor de Mg, apresenta extinção lenta, com menor geração de calor (HAGEMANN, 2011). Dessa forma, a elevação do pH e a liberação de calor (e consequente aumento de temperatura) durante o processo de caleação acontece de maneira mais expressiva quando se utiliza cal do tipo cálcica.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

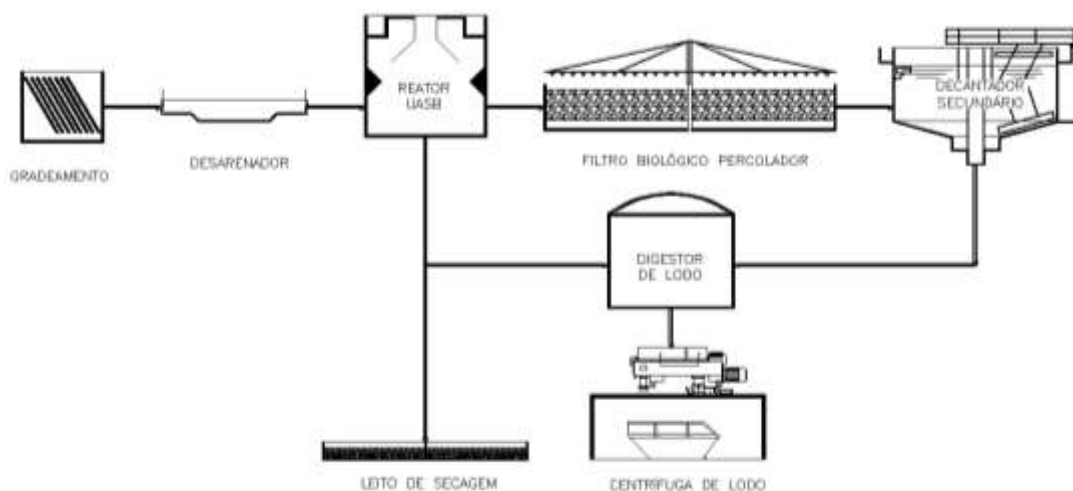
Neste tópico foi descrito o sistema experimental utilizado para a higienização do lodo de esgoto, sua operação e monitoramento, bem como os materiais e reagentes utilizados. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Hidráulica e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina – UEL.

4.1 LODO UTILIZADO NO EXPERIMENTO

Para a realização dos experimentos foi utilizado o lodo de esgoto digerido por processo anaeróbico e desidratado por centrífuga da Estação de Tratamento de Esgoto Sanitário ETE Norte da Sanepar, localizada na cidade de Londrina (latitude entre 23°08'47" e 23°55'46" sul e longitude entre 50°52'23" e 51°19'11" oeste), na sub-bacia do Ribeirão Lindóia.

O sistema de tratamento de esgoto desta ETE é constituído por gradeamento, caixa de areia, tratamento biológico em reator anaeróbico de manta de lodo, filtro biológico e decantador secundário. Parte do lodo gerado nos reatores de manta de lodo (UASB) e o lodo do decantador secundário são transferidos para biodigestores e, após a estabilização anaeróbia, este lodo é encaminhado para a centrífuga onde é desidratado.

Figura 2 – Esquema representativo do sistema de tratamento utilizado na ETE Norte



Fonte: AUTOR

As características do lodo estão relacionadas às características do esgoto afluente à estação de tratamento apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Características do esgoto afluente à estação de tratamento

Parâmetro	Média	Desvio padrão
pH	7,78	0,52
Alcalinidade	273,60	60,10
N-Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	55,30	20,10
NKT (mg N-NH ₃ /L)	77,50	33,60
DQO (Total)	325,00	204,00
DQO (Filtrado)	165,00	72,00

Como os experimentos foram realizados em batelada e considerando as condições de armazenamento presentes no laboratório, a coleta de lodo na ETE Norte foi realizada conforme a necessidade. O lodo desidratado por centrífuga era condicionado quimicamente com polímeros e cal para facilitar o processo de desidratação, no entanto nos dias das coletas garantiu-se que a cal não fosse adicionada para não interferir nos experimentos.

Ao todo foram realizadas 4 coletas, nas quais o lodo era recolhido diretamente do bocal de saída da centrífuga, em baldes com capacidade para 15kg, completados até a metade aproximadamente. Três baldes foram retirados na primeira coleta e dois em cada uma três coletas seguintes, sendo um utilizado imediatamente e os demais armazenado sob refrigeração para uso na batelada seguinte.

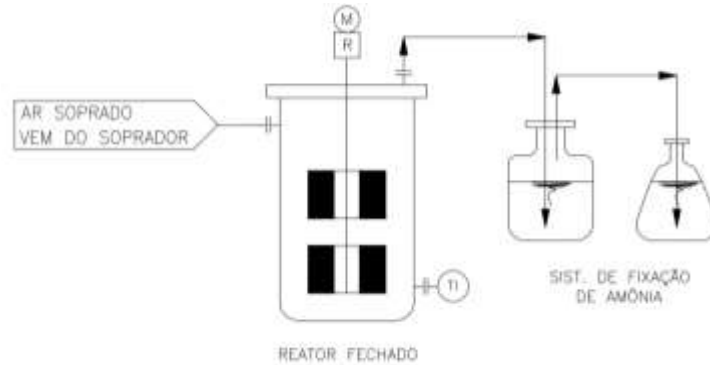
4.2 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Visando a otimização do processo de higienização do lodo gerado na Estação de Tratamento de Esgoto ETE Norte, foi utilizada uma instalação experimental em escala piloto, composta por um reator batelada fechado com sistema de homogeneização.

O reator foi construído em PVC, de 255 mm de diâmetro e 700 mm de altura, e envolvido com manta de isolamento térmico a fim de possibilitar isolamento térmico da parede e permitir que o calor, liberado pela reação exotérmica entre a água do lodo e o material alcalinizante, se mantivesse por mais tempo em contato com o lodo. O

reator possuía ainda uma tampa em PVC, que também foi revestida com manta de isolamento térmico.

Figura 3 – Esquema representativo da instalação experimental



Fonte: AUTOR

Figura 4 – Instalação experimental



Fonte: AUTOR

O sistema de homogeneização era composto por agitador mecânico de pás, cujo motor utilizado foi proveniente de uma bateadeira industrial da marca Lieme®, adaptada para promover a mistura em baixa rotação e de maneira centralizada.

Com o intuito de realizar o controle de temperatura de hora em hora dentro do reator, uma vez que este é um fator que intervém no processo, foi feita uma abertura

na parte inferior da parede do mesmo para que um termômetro digital de haste metálica fosse introduzido no interior do reator a cada amostragem (de hora em hora). Para minimizar a perda de calor e de amônia, esta abertura foi devidamente vedada com borracha esponjosa.

Outra abertura foi feita na parede do reator, desta vez na parte superior. Nesta abertura foi conectado um conjunto de mangueiras para que fosse introduzida uma corrente de ar na atmosfera interna do reator, antes da abertura do reator para coleta de amostras, com o objetivo de carrear a amônia formada a partir do nitrogênio amoniacal do lodo para uma saída na tampa do reator. Nesta saída do lado oposto à introdução de ar, foi conectada uma mangueira cuja extremidade oposta era acoplada em um recipiente para coleta (fixação) da amônia formada no decorrer do experimento. A solução utilizada para fixação da amônia foi o ácido bórico 2% (m/v) (HERNANDES; CAZETTA, 2001). A corrente de ar era induzida por meio de uma bomba de aquário e era ligada apenas no período de coleta de amostras.

A fim de proceder a mistura de maneira intermitente, o equipamento foi ligado em um timer programado para ligar e desligar o misturador (15 min ligado/45 min desligado).

4.3 PROCESSO DE HIGIENIZAÇÃO

A higienização do lodo foi realizada por meio do processo de estabilização alcalina, sendo utilizado o óxido de cálcio (cal virgem) como agente alcalinizante. Foram avaliadas três dosagens de cal virgem, 20%, 30% e 40% em relação a massa seca de lodo utilizado, definidas de acordo com informações obtidas na literatura e, para cada dosagem, foram realizadas três repetições. A cal virgem utilizada no experimento foi um produto comercial adquirida em lojas de materiais para construção da marca Mottin Pavin & Cia Ltda.

A primeira etapa do processo de higienização foi realizada em reator fechado (48 horas) e em seguida o material foi colocado em leitos abertos para a atmosfera até completar o período de maturação (45 dias).

Em cada batelada, o reator foi operado com uma massa de lodo bruto entre 5 e 12 kg na qual foi acrescentada a quantidade de cal definida com base no teor de sólidos presente no lodo, seguindo a Equação (3).

$$\text{Quantidade de cal} = \text{Massa de lodo} \times \frac{\% \text{ s\u00f3lidos}}{100} \times \% \text{ dosagem de cal} \quad (3)$$

Na primeira fase do processo de higieniza\u00e7\u00e3o, o lodo de esgoto coletado na esta\u00e7\u00e3o de tratamento foi misturado com a cal virgem dentro do reator, a fim de se obter uma perfeita homogeneiza\u00e7\u00e3o do lodo com a cal, visto que a homogeneiza\u00e7\u00e3o \u00e9 um fator de extrema import\u00e2ncia na completa elimina\u00e7\u00e3o de organismos patog\u00eanicos.

A mistura foi realizada de forma intermitente, ou seja, para cada 15 minutos de mistura, 45 minutos de repouso. Esta estrat\u00e9gia foi definida a fim de evitar sobrecarga no equipamento de mistura e foi estabelecida aleatoriamente, visto que n\u00e3o foi encontrado nenhum estudo anterior semelhante que direcionasse estes par\u00e2metros.

Uma batelada inicial foi realizada com dosagem de cal de 30% visando um estudo preliminar do funcionamento do equipamento. O material foi mantido sob mistura dentro do reator durante 6 dias.

A partir desta batelada preliminar, optou-se por alterar o tempo de perman\u00eancia do lodo dentro do reator para apenas 1 dia. Esta redu\u00e7\u00e3o do tempo de manuten\u00e7\u00e3o do lodo em processo de higieniza\u00e7\u00e3o dentro do reator foi estabelecida uma vez que foi observado, no teste inicial, que ao longo dos 6 dias o vapor d' \u00e1gua presente dentro do reator condensava na tampa e retornava para a massa de lodo.

Foi realizada uma batelada para cada dosagem de cal mantendo o lodo durante 1 dia (24 horas) no reator. Nas repeti\u00e7\u00f5es seguintes preferiu-se manter o lodo em mistura dentro do reator por 2 dias (48 horas) ao inv\u00e9s de apenas 1 dia. Nesta nova condi\u00e7\u00e3o, ap\u00f3s 24 horas de experimento o reator era aberto para uma coleta de amostra do lodo para an\u00e1lise. Ap\u00f3s as 48 horas, o lodo era armazenado em leitos abertos conforme j\u00e1 mencionado, sendo homogeneizado a cada amostragem.

4.4 PAR\u00c2METROS ANALISADOS

As an\u00e1lises laboratoriais realizadas no lodo bruto e no lodo higienizado para cada batelada, assim como a frequ\u00eancia de monitoramento s\u00e3o apresentadas na Tabela 14. Com o objetivo de garantir maior representatividade dos resultados, em cada amostragem para realiza\u00e7\u00e3o das an\u00e1lises, o lodo caleado era previamente

homogeneizado e a coleta da amostra foi realizada em diversos pontos do reator (primeira fase) e do leito (segunda fase).

Tabela 14 – Parâmetros analisados, metodologia aplicada e frequência de monitoramento

Parâmetro	Método	Frequência de monitoramento	
		Lodo Bruto	Lodo higienizado
pH	Potenciométrico (HANDA; NOGUEIRA, 2000)	Cada coleta	1, 2, 7, 15, 30 e 45 dias
Temperatura	Medição direta	Início do experimento	De hora em hora (exceto período das 18h-8h) durante o funcionamento do reator
Sólidos totais	Gravimétrico (APHA, 2005)	Cada coleta	1, 2, 30 e 45 dias
Sólidos fixos	Gravimétrico (APHA, 2005)	Cada coleta	1, 2, 30 e 45 dias
Sólidos voláteis	Gravimétrico (APHA, 2005)	Cada coleta	1, 2, 30 e 45 dias
Umidade	Gravimétrico (APHA, 2005)	Cada coleta	1, 2, 30 e 45 dias
Coliformes totais	Substrato definido <i>Colilert</i> ® (BARÉS <i>et al.</i> , 2011)	Cada coleta	1, 2, 7, 15, 30 e 45 dias
Coliformes termotolerantes	Substrato definido <i>Colilert</i> ® (BARÉS <i>et al.</i> , 2011)	Cada coleta	1, 2, 7, 15, 30 e 45 dias
Ovos de helmintos	Yanko (1987) modificada (SOCCOL; PAULINO; CASTRO, 2000)	Cada coleta	1, 2, 7, 15, 30 e 45 dias
NKT	Kjeldahl (APHA, 2005)	Cada coleta	1, 2 e 45 dias
N-amoniacal	Titulométrico (APHA, 2005)	Cada coleta	1, 2 e 45 dias

A amônia livre fixada na solução de ácido bórico foi quantificada através do método titulométrico (APHA, 2005) após 24 e 48h de experimento dentro do reator.

As análises de fósforo e compostos inorgânicos foram realizadas pelo laboratório de análises agronômicas LaborSolo, na cidade de Londrina. Dentre os compostos inorgânicos que podem estar presentes no lodo, foram analisados a concentração de Cádmio, Chumbo, Cromo, Mercúrio, Níquel e Selênio, pois são os compostos que o referido laboratório está apto a realizar.

Por fim, com a intenção de verificar a qualidade da cal comercial utilizada para promover a higienização, foram realizadas análises do teor de CaO total e CaO

disponível. As metodologias empregadas para tais determinações foram as descritas por Glória e Delgado (1970) e envolvem método quelatométrico e titulométrico.

Soccol, Paulino e Castro (2000) descreveram a técnica para determinação do número e da viabilidade de ovos de helmintos (YANKO, 1987, modificada). Amostras de lodo (bruto e tratado) devem ser homogeneizadas com solução tamponada contendo surfactante e em seguida filtrada para retenção de partículas sólidas. O material filtrado deve permanecer em repouso *overnight* para sedimentação. O sobrenadante deve ser retirado e o sedimento submetido à centrifugação. O novo sedimento deve ser ressuspense em solução de sulfato de zinco (v/v) e centrifugado novamente. O sobrenadante deve ser transferido para um frasco e diluído à metade da concentração com água destilada, devendo ficar em repouso por 3 horas. Após este período, o sobrenadante deve ser removido e o sedimento ressuspense e centrifugado. O sedimento resultante deve ser agrupado e ressuspense em ácido/álcool-éter etílico (7ml/3ml). Centrifugar o material e descartar o sobrenadante em seguida. Para efetuar a quantificação dos ovos, deve-se ressuspender o sedimento em ácido sulfúrico. Parte deve ser utilizada para contagem de ovos e o restante deve ser incubado em estufa a 28°C de 2 à 4 semanas para determinação da viabilidade.

Esta técnica foi escolhida para a presente pesquisa por ser aplicável na recuperação de ovos de helmintos em material sólido (lodo submetido à caleação) e material semi-sólido. Além disso, apesar de ser um procedimento demorado, a técnica apresenta taxa de recuperação de ovos de 90% (SOCCOL; PAULINO; CASTRO, 2000).

Em relação à técnica utilizada para determinação de coliformes termotolerantes, o método do substrato cromogênico foi escolhido em substituição à técnica dos tubos múltiplos, que é a recomendada e aceita pela resolução do CONAMA 375 (2006) devido à facilidade e rapidez para realização das análises. Uma vez que a técnica de tubos múltiplos exige a diluição do lodo, tornando-o uma amostra líquida e de fraca coloração, supõe-se que o substrato cromogênico pode ser aplicado sem maiores problemas nesta pesquisa.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, inicialmente serão abordados e analisados os parâmetros físico-químicos do lodo relacionados ao processo de caleação (temperatura, pH, umidade, sólidos totais e voláteis, NKT e N-amoniaco) e em seguida os resultados dos parâmetros bacteriológicos (coliformes termotolerantes) e parasitológicos (viabilidade de ovos de helmintos) do lodo, de acordo com a aplicação de diferentes dosagens de cal.

Os resultados obtidos em 1 e 2 dias de contato referem-se ao processo de higienização no reator fechado, enquanto que os resultados de 7, 15, 30 e 45 dias referem-se ao período de maturação do lodo em recipientes abertos.

As quantidades de lodo bruto e de cal utilizadas em cada batelada estão indicadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Quantidade de lodo bruto e cal utilizada em cada batelada

Batelada	Dosagem de cal (%)	Massa de lodo úmido (kg)	Massa de lodo seco (kg)	Massa de cal (kg)
1	30	8,930	1,740	0,520
2	20	9,910	2,004	0,385
3	40	11,120	2,243	0,895
4	20	10,660	2,158	0,430
5	30	9,625	1,723	0,520
6	40	9,925	1,882	0,750
7	20	6,720	1,220	0,245
8	30	8,270	1,856	0,495
9	40	8,645	1,903	0,775

5.1 CARACTERÍSTICAS DO LODO BRUTO

O lodo bruto, proveniente do digestor anaeróbio e desidratado em centrífuga, coletado na ETE Norte da SANEPAR, apresentou as características médias exibidas na Tabela 16.

Tabela 16 – Características do lodo bruto proveniente do digestor anaeróbio de lodo e desidratado em centrífuga para cada batelada

Parâmetro	Bateladas									Média	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Sólidos totais (%)	19,5	20,2	20,2	20,3	17,9	19,0	18,2	22,5	22,0	20,0	1,2
SV/ST (%)	61,7	62,1	62,3	61,7	61,8	62,2	61,4	61,5	61,3	61,8	0,3
Umidade (%)	80,5	79,8	79,8	79,8	82,1	81,0	81,8	77,6	78,0	80,0	1,2
NKT (% MS)	4,3	3,8	8,2	5,1	5,0	4,9	5,5	4,5	5,3	5,2	0,8
N-amoniacoal (% MS)	0,5	0,6	0,8	0,5	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,5	0,1
pH	8,3	9,0	8,9	8,7	8,3	8,1	8,7	8,0	8,2	8,5	0,3
Coliformes termotolerantes (log NMP/g de ST)	4,4	4,3	4,8	4,4	5,3	3,9	3,6	4,7	4,4	4,4	0,5
Ovos viáveis de helmintos (ovos/g ST)	4,6	1,4	6,3	4,0	5,2	2,0	2,1	0,7	5,5	3,5	1,7

Pires *et. al.* (2007) caracterizaram lodo de esgoto bruto proveniente de digestor anaeróbio e obtiveram resultados de umidade e nitrogênio semelhantes aos encontrados nesta pesquisa, com valores de 72,3% e 4,1% respectivamente.

Comparando as características do lodo bruto gerado na ETE Norte de Londrina com os dados de outras estações de tratamento de esgoto no estado do Paraná apresentados por Bittencourt (2014), que também utilizam sistemas anaeróbios para o tratamento, verifica-se que os resultados de pH encontram-se elevados (média de 8,5) em relação às demais ETEs, cujo pH gira em torno de 6,8.

No que diz respeito às características sanitárias do lodo bruto, o NMP/g ST de coliformes termotolerantes das amostras do lodo de esgoto bruto encontravam-se com valores acima de 3 unidades logarítmicas (log) NMP/g de ST, que é o limite máximo permitido pela resolução do CONAMA 375/06 para que o lodo seja enquadrado como classe A e destinado à agricultura assim, necessitando da etapa de higienização. Porém, considerando as características bacteriológicas em termos de coliformes termotolerantes, este lodo pode ser classificado como classe B pois apresenta concentrações menores que 6 unidades logarítmicas (log) NMP/g de ST.

A exposição humana direta ao lodo de esgoto classe B ainda apresenta risco significativo à saúde e, por isso, deve-se seguir as restrições de aplicação estabelecidas pelas normas vigentes (IRANPOUR *et. al.*, 2004 apud BITTENCOURT, 2006).

A caracterização parasitológica permite inferir à respeito do nível de saúde e condições socioeconômicas da população, além de informações referentes às condições de saneamento básica da região de estudo (SILVA *et. al.*, 2014). Lozer (2012) estudou o desaguamento e higienização de lodo de esgoto gerado em ETE constituída por um conjunto de reator UASB + biofiltro aerado submerso e os resultados das análises do lodo bruto mostraram uma variação de 0,1 a 40 ovos viáveis de helmintos por grama de ST.

Comparando as características do lodo de esgoto bruto desta pesquisa com os resultados de Lozer (2012) é possível supor que a população abastecida pela coleta de esgoto da ETE Norte de Londrina apresenta-se mais saudável em termos de parasitoses, uma vez que as concentrações de ovos viáveis de helmintos encontradas no lodo foram baixas (na faixa de 0,7 à 6,3 ovos/g ST). Entretanto, para uma confirmação desta conclusão seria necessário conhecer as características parasitológicas do esgoto bruto recebido na ETE Norte de Londrina.

5.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO LODO DURANTE O PROCESSO DE CALEAÇÃO

5.2.1 Temperatura

Os dados de temperatura do lodo bruto e da mistura lodo + cal durante o tempo de experimento dentro do reator são apresentados nas Figuras 5, 6 e 7. Os dados das bateladas foram agrupados de acordo com a dosagem de cal utilizada.

Para a primeira batelada realizada de cada dosagem (bateladas 1, 2 e 3), as temperaturas registradas no lodo bruto antes do início dos experimentos, foram de 7,5°C, 11,9°C e 10,4°C, respectivamente. Estes valores se mostram abaixo da média da temperatura ambiente registrada nestes dias, pois o lodo foi mantido sob refrigeração até o momento do experimento.

Nas demais bateladas optou-se por manter o lodo em temperatura ambiente por aproximadamente 12 horas antes de utilizá-lo.

Figura 5 – Variação de temperatura durante o tempo de mistura dentro do reator para as bateladas com dosagem de cal de 20%

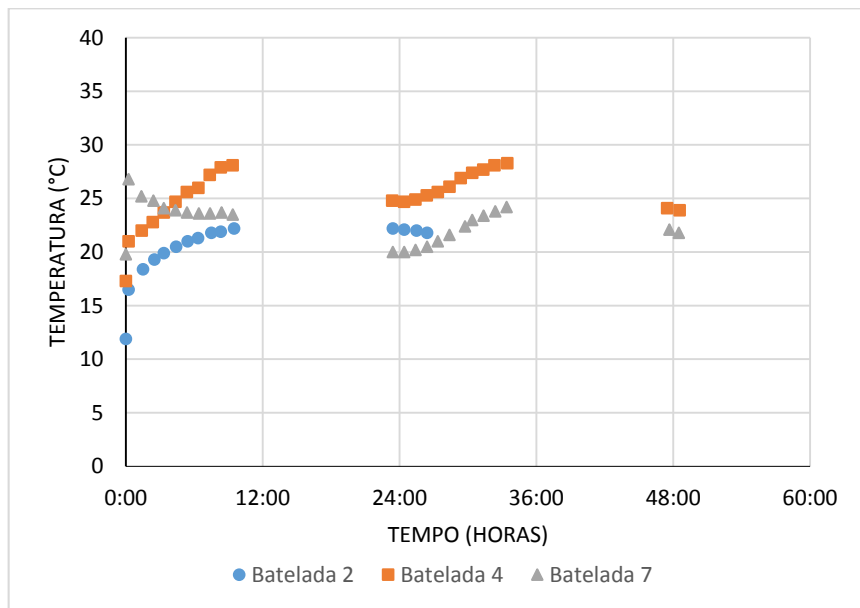


Figura 6 - Variação de temperatura durante o tempo de mistura dentro do reator para as bateladas com dosagem de cal de 30%

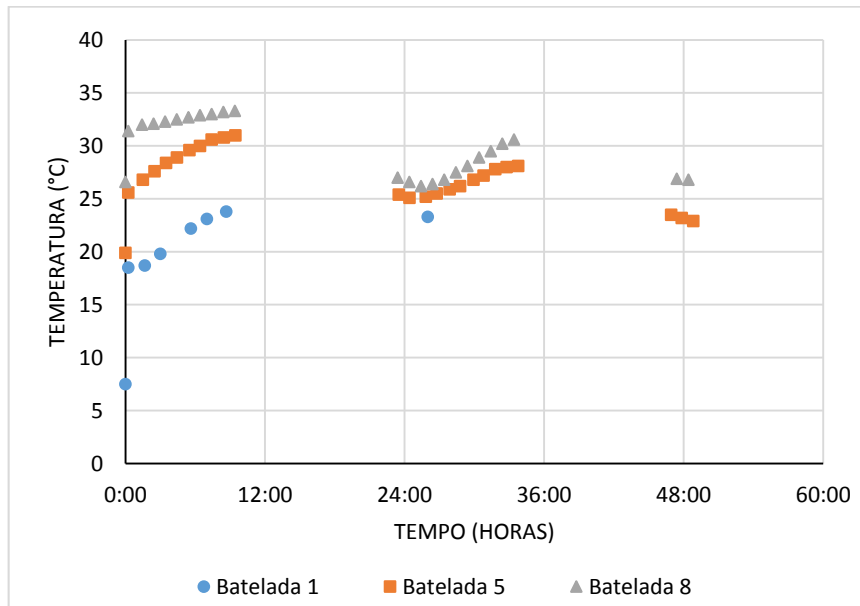
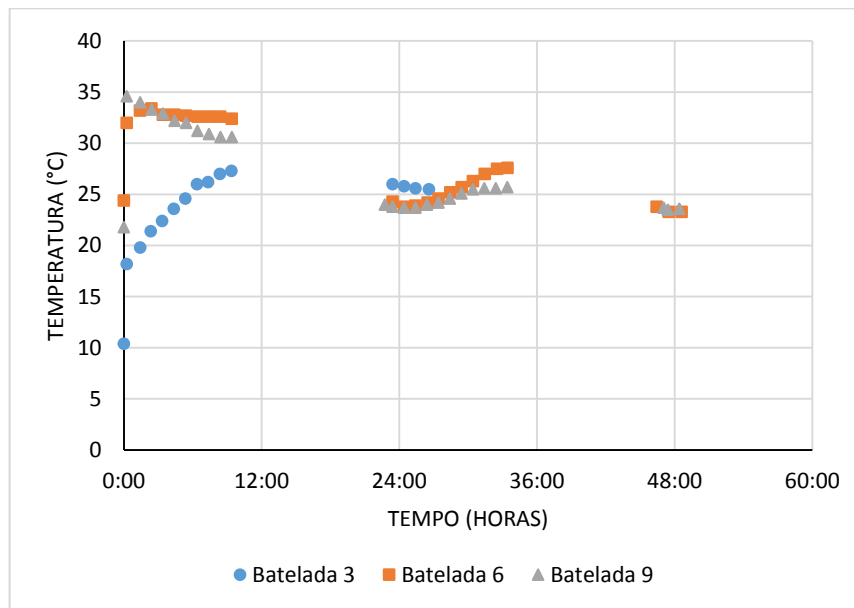


Figura 7 - Variação de temperatura durante o tempo de mistura dentro do reator para as bateladas com dosagem de cal de 40%



Observando os resultados de temperatura obtidos em todas as bateladas, verificou-se um considerável aumento de temperatura logo após a adição da cal. Este fato já era esperado, e ocorreu devido à liberação de calor proveniente da reação exotérmica da cal com a água do lodo. Dentre as dosagens, a que atingiu maior pico de temperatura (34,6°C na batelada 9) durante o processo foi a caleação de 40%.

As médias de temperatura durante o processo dentro do reator com dosagens de cal de 20, 30 e 40% para as três bateladas foram de 25,8°C, 29,4°C e 31,8°C, respectivamente. Estes resultados de temperatura se assemelham aos resultados de temperatura obtidos no estudo de Godinho (2003), que obteve média de temperatura de 27°C nos três tratamentos com dosagens de cal de 30, 40 e 50%.

Verificou-se que os picos de temperaturas devido ao processo ocorreram durante as 12 primeiras horas de experimento. Desconsiderando as primeiras bateladas de cada dosagem (lodo em temperatura de refrigeração), o lodo de esgoto, com aproximadamente 80% de umidade inicial, com adição de cal atingiu temperaturas médias de 24,6°C, 30,7°C e 32,5°C para 20%, 30% e 40% de cal respectivamente.

A Tabela 17 apresenta as médias de temperaturas obtidas durante as primeiras 12 horas de experimento para cada batelada.

Tabela 17 – Médias das temperaturas obtidas nas primeiras 12 horas de experimento para cada batelada

Dosagem de cal	Média das temperaturas (°C)		
	1ª Batelada	2ª Batelada	3ª Batelada
Caleação 20%	20,3	24,9	24,3
Caleação 30%	21,0	28,9	32,5
Caleação 40%	23,7	32,7	32,2

Apesar do reator possuir uma manta de isolamento térmico, a mesma não se mostrou eficiente na manutenção de temperatura, uma vez que em todas as bateladas notou-se uma redução na temperatura durante os períodos da noite (12 a 24 horas de contato e 36 a 48 horas de contato), período em que a temperatura ambiente sofre uma redução natural.

A Tabela 18 contém as informações de temperatura ambiente registradas nos dias de experimento pelo Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR).

Tabela 18 – Temperaturas ambiente registradas nos dias de experimento para cada batelada

Dosagem de cal	Variação da temperatura ambiente (°C)		
	1ª Batelada	2ª Batelada	3ª Batelada
Caleação 20%	13,4 à 17,0	9,6 à 27,4	14,0 à 26,2
Caleação 30%	11,0 à 25,2	14,4 à 30,0	14,4 à 31,2
Caleação 40%	17,0 à 28,2	13,0 à 29,6	15,1 à 22,8

Fonte: IAPAR (2015)

Analisando os valores médios de temperatura durante as primeiras 12 horas de cada batelada, juntamente com as informações de temperatura ambiente registradas nos dias de experimento, foi possível identificar a influência da temperatura ambiente no processo.

A manutenção do processo de mistura durante a fase de reação da cal virgem com o lodo permitiu o contínuo aumento de temperatura observado na maioria das bateladas. Isto porque a movimentação da massa de lodo propicia um maior contato das partículas de cal com a água do lodo (PEGORINI *et al.*, 2006a apud ROCHA, 2009).

Rocha (2009), em seu experimento de caleação com cal virgem, atingiu níveis bem significativos de temperatura em curtos intervalos de tempo. Após 2 horas de mistura, a temperatura alcançou valores de 60°C ou mais e permaneceu por 5 horas para concentrações de cal virgem de 21% e 29,4%. O autor estudou lodo desaguado em leitos de secagem com umidade média de aproximadamente 48%.

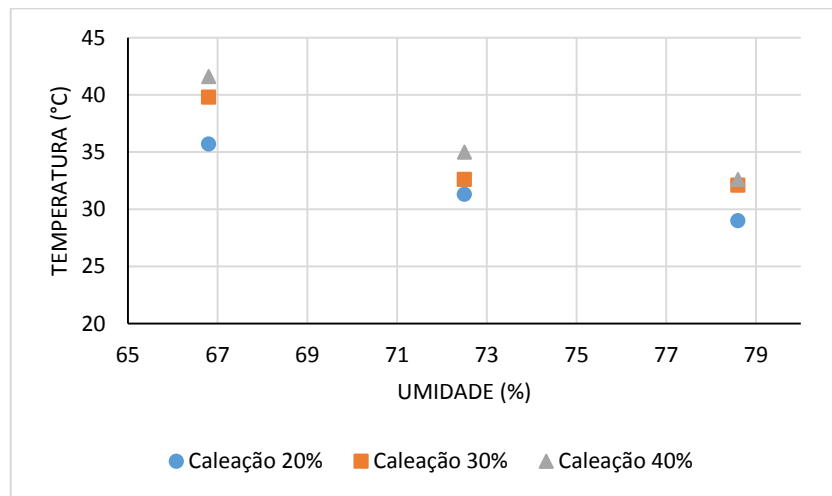
O mesmo não ocorreu nesta pesquisa, mesmo nas maiores dosagens de cal, provavelmente devido a elevada umidade do lodo bruto utilizado, uma vez que o calor específico da água é maior que o do lodo e consome o calor resultante da reação exotérmica (ROCHA, 2009). Este autor cita que Pegorini *et al.* (2006a) constataram que maiores temperaturas devido à reação do lodo com a cal são alcançadas em lodos com menores teores de umidade e, em alguns casos, pode chegar à combustão. Entretanto, Ilhenfeld (1999) afirma que, para que haja uma boa reação com a cal e para que a mistura atinja temperaturas altas, o limite mínimo de umidade do lodo deve estar próximo à 70%.

Malta e Tsutiya (2003) estudaram a otimização da estabilização cálcica de biossólido produzido em uma estação, cujo processo de redução da matéria orgânica pelas bactérias aeróbias nos reatores biológicos utilizou o oxigênio puro. Os pesquisadores utilizaram dosagens de 10, 20, 35, 50, 65 e 80% e para as dosagens de 10, 20, 35 e 50 não foi observada uma elevação significativa de temperatura, que manteve-se abaixo de 50°C.

A fim de verificar a relação entre umidade do lodo e elevação de temperatura logo após a adição da cal virgem e nas horas subsequentes, amostras de lodo em três diferentes teores de umidade (78,6%, 72,5% e 66,8%) foram avaliadas para cada dosagem de cal estudada. Os resultados são apresentados na Figura 8.

Foi possível identificar a influência da umidade na elevação da temperatura da mistura, onde constatou-se que lodo com menor umidade inicial apresentou elevação de temperatura mais pronunciada (35,7 – 41,6°C), comparado ao lodo com umidade maior (29 – 32,6°C), quando a cal foi adicionada à massa, corroborando com Rocha (2009), Pegorini *et al.* (2006a) citado por Rocha (2009) e Ilhenfeld (1999).

Figura 8 – Temperaturas atingidas imediatamente após a adição de cal em função da umidade do lodo para as três dosagens de cal estudadas



5.2.2 pH

Os resultados da variação de pH obtidos nos experimentos de higienização alcalina do lodo de esgoto com cal virgem em reator fechado estão indicados nas Figuras 9, 10 e 11. Assim como para a temperatura, os resultados obtidos referentes a este parâmetro foram agrupados de acordo com a dosagem de cal utilizada.

Figura 9 – Variação de pH nos experimentos de caleação com dosagem de cal de 20%

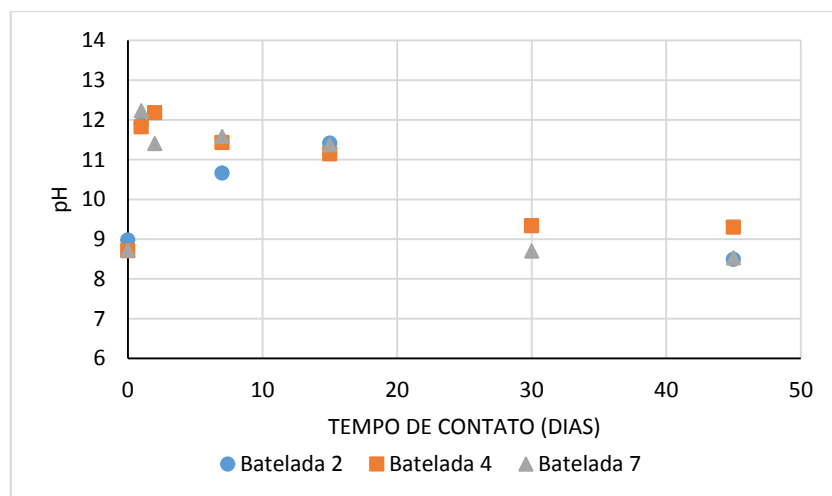


Figura 10 – Variação de pH nos experimentos de caleação com dosagem de cal de 30%

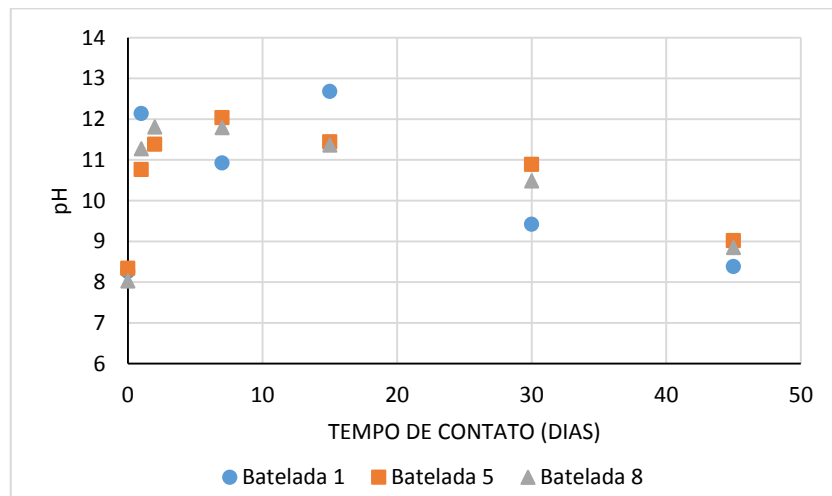
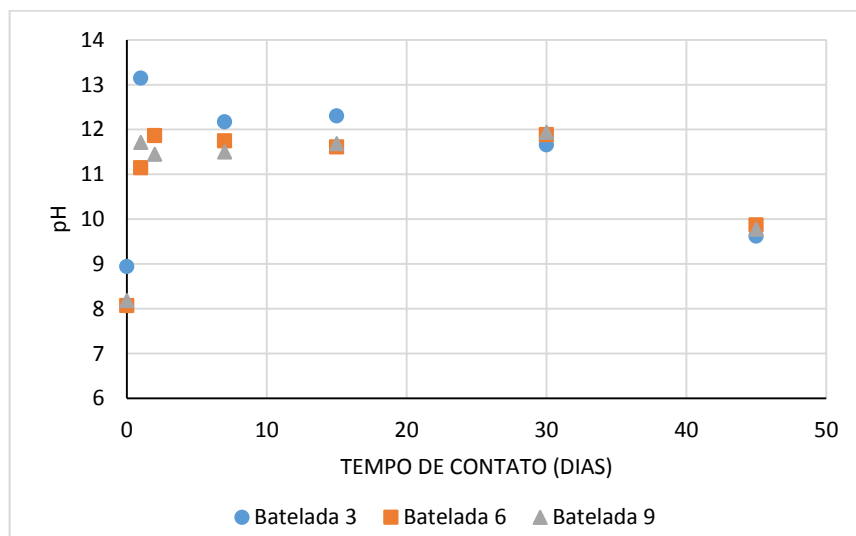


Figura 11 – Variação de pH nos experimentos de caleação com dosagens de cal de 40%



Pela resolução CONAMA 375/06, para que a caleação seja considerada um processo de redução significativa de patógenos, é preciso que o pH seja elevado até pelo menos 12, por um período mínimo de duas horas. A fim de evitar a perda da amônia liberada no processo, evitou-se abrir o reator durante as primeiras 24 horas. Por isso o pH não foi analisado logo após a mistura do lodo com a cal e nem após 2 horas.

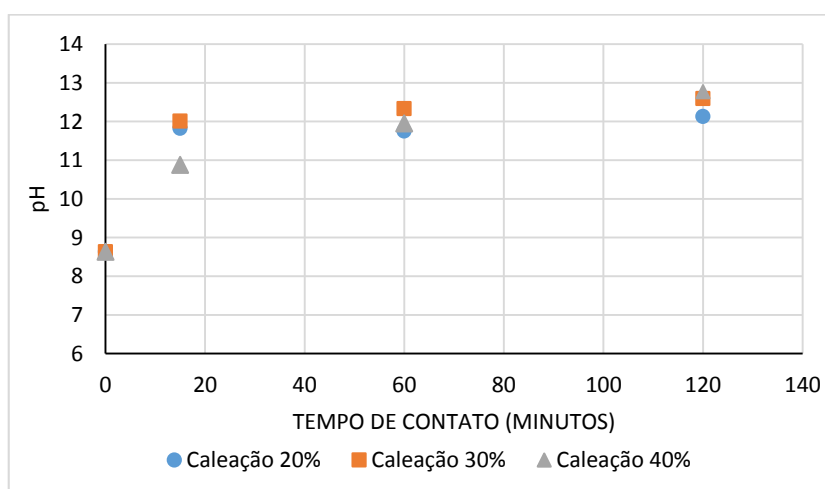
O processo de caleação com dosagem de 40% foi o que manteve o pH em níveis acima de 11,5 por um período maior de tempo, até o 30º dia de armazenamento,

decaindo para 9 aos 45 dias. A concentração de 30% de cal referente aos sólidos do lodo manteve o pH acima de 11,5 por 7 dias, enquanto que os tratamentos com dosagem de cal de 20% já apresentaram pH abaixo de 11,5 após 48 horas de contato. Quanto maior o tempo de contato com níveis de pH elevado, mais eficiente é a higienização e menores são as chances de recrescimento dos microrganismos patogênicos.

Rocha (2009), tratando lodo desaguado em leitos de secagem com concentração de sólidos de aproximadamente 53% com doses de cal de 12,6%, 21% e 29,4%, conseguiu atingir valores de pH acima de 13 logo após a mistura, sendo mantido em 12 após 24 horas de contato. Estudos semelhantes realizados por Godinho (2003) e Prim (2011) em lodos coletados após a desidratação em leito de secagem (ST variando entre 12 e 33%), apresentaram resultados de pH acima do valor recomendado (pH=12) por mais de 24 horas, para dosagens de cal de 15, 30, 40, 45 e 50%.

Com o intuito de verificar a elevação do pH nas primeiras horas de experimento para cada dosagem de cal virgem estudada, o reator foi operado novamente para que fossem coletadas amostras imediatamente após a mistura (aproximadamente 15 minutos), e após 1 e 2 horas. Os resultados destas análises são mostrados na Figura 12.

Figura 12 – Variação do pH em relação ao tempo para cada uma das dosagens de cal estudadas – Bateladas dentro do reator

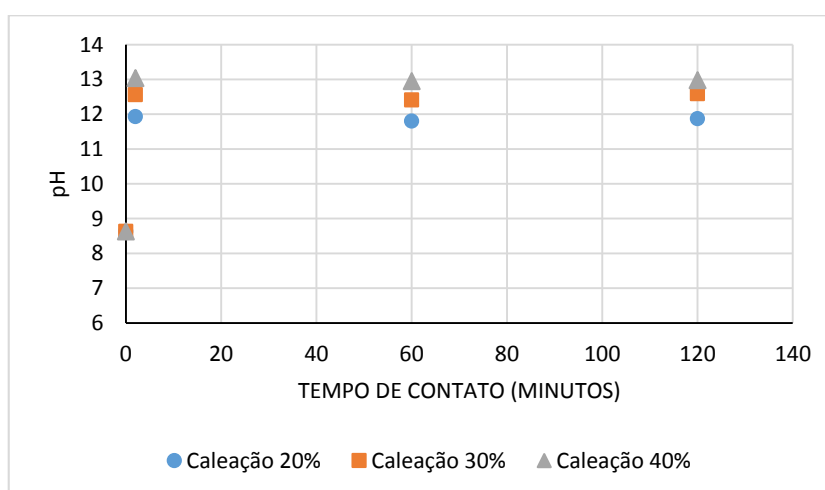


Considerando os resultados mostrados na Figura 12, foi possível perceber que apenas para a dosagem de 30% de cal o pH elevou-se à pelo menos 12 logo após a

adição do alcalinizante. Para as concentrações de cal de 20% e 40%, este nível foi atingido apenas após 2 horas de mistura devido ao fato da mistura proporcionada pelo agitador mecânico dentro do reator não ocorrer de forma efetiva durante as primeiras horas. A mistura ocorre em baixa rotação devido à alta densidade relativa do lodo, o que exige um tempo maior para que a cal seja totalmente integrada à massa de lodo.

Amostras de aproximadamente 50g de lodo foram misturadas com cal manualmente para comprovar a elevação do pH. Os resultados são apresentados na Figura 13.

Figura 13 – Variação de pH em função do tempo para cada uma das dosagens de cal estudadas – Bateladas realizadas manualmente



Analisando os resultados da Figura 13 verificou-se que a adição de cal foi eficiente na elevação do pH do lodo à níveis superiores a 12 para concentrações de cal de 30% e 40%.

Nas bateladas homogêneas manualmente foram utilizadas quantidades de lodo inferiores (aproximadamente 50g) às quantidades utilizadas nos experimentos dentro do reator (aproximadamente 10,5 kg). Isto facilitou a incorporação da cal em toda a massa de lodo possibilitando atingir, imediatamente, os níveis de pH observados.

5.2.3 Porcentagem De Sólidos (totais e voláteis)

As concentrações de sólidos totais (ST) sofreram efeito do tempo de mistura dentro do reator, do tempo de armazenamento e das dosagens de cal. Os resultados

da variação da concentração de sólidos devido ao processo de caleação para cada dosagem e cada batelada estão dispostos na Tabela 19.

Tabela 19 – Variação das concentrações de sólidos (totais e voláteis) de acordo com a dosagem de cal e tempo de mistura e armazenamento para cada batelada

CALEAÇÃO 20%						
Experimento	Teor de sólidos	Tempo de contato (dias)				
		Bruto	1	2	30	45
Batelada 2	ST (%)	20,22	NR*	NR*	NR*	75,96
	SV/ST (%)	62,09	NR*	NR*	NR*	51,37
Batelada 4	ST (%)	20,25	23,81	25,41	52,35	77,16
	SV/ST (%)	61,71	52,10	48,20	48,80	46,82
Batelada 7	ST (%)	18,16	21,67	21,74	62,23	88,54
	SV/ST (%)	61,41	50,31	48,05	46,95	47,16
CALEAÇÃO 30%						
Experimento	Teor de sólidos	Tempo de contato (dias)				
		Bruto	1	2	30	45
Batelada 1	ST (%)	19,48	NR*	NR*	52,64	93,73
	SV/ST (%)	61,67	NR*	NR*	48,58	48,06
Batelada 5	ST (%)	17,90	20,44	22,77	47,88	80,96
	SV/ST (%)	61,80	54,40	46,49	47,17	46,06
Batelada 8	ST (%)	22,45	26,14	27,48	51,59	88,38
	SV/ST (%)	61,47	51,37	46,23	47,35	45,21
CALEAÇÃO 40%						
Experimento	Teor de sólidos	Tempo de contato (dias)				
		Bruto	1	2	30	45
Batelada 3	ST (%)	20,17	NR*	NR*	56,93	91,87
	SV/ST (%)	62,34	NR*	NR*	42,78	43,73
Batelada 6	ST (%)	18,96	22,47	24,80	41,90	68,31
	SV/ST (%)	62,16	48,88	41,96	42,91	43,14
Batelada 9	ST (%)	22,01	30,23	31,11	61,75	93,5
	SV/ST (%)	61,28	41,60	39,90	41,44	42,54

* Não realizado

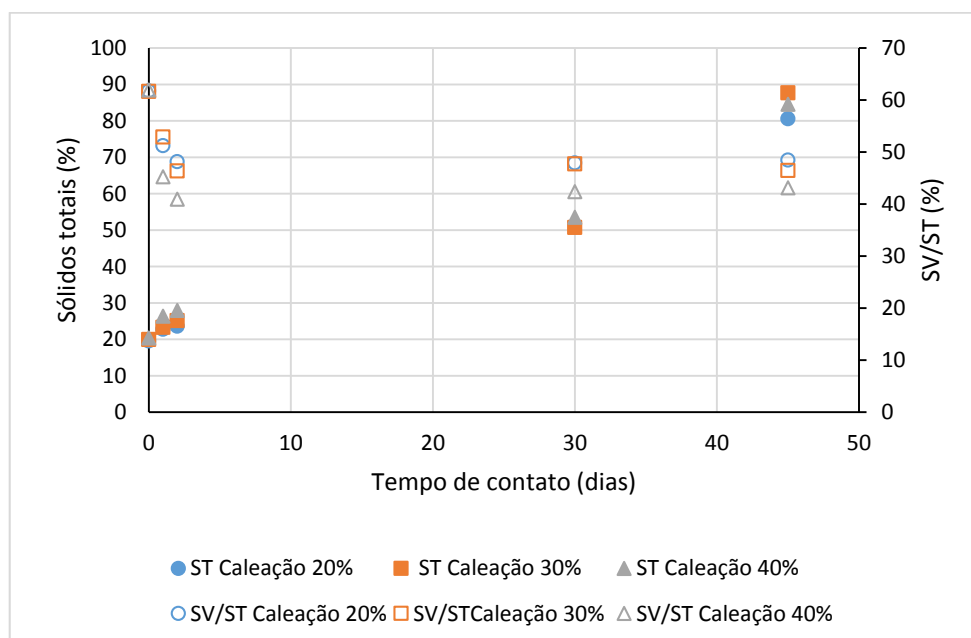
Um levantamento referente à utilização agrícola de lodo de esgoto produzido e higienizado por algumas estações de tratamento no estado do Paraná mostrou que

lotes de lodo de esgoto misto (tratamento anaeróbio + pós tratamento), higienizados por estabilização alcalina prolongada, apresentaram média de ST de 50,8% após 30 dias de contato. Os lotes de lodo para higienização eram constituídos de lodo desaguado em centrífuga e lodos desaguados em leito de secagem e as dosagens de cal utilizada variaram de 30 à 50% dependendo da unidade de gerenciamento de lodo (BITTENCOURT, 2014).

Estas informações corroboram com os resultados obtidos nesta pesquisa, em que os valores de ST de todas as bateladas e para todas as dosagens estudadas obtidos em 30 dias de contato se encontram próximos dos valores descritos por Bittencourt (2014), com média de 53,41%.

Foi possível observar que, no decorrer do tempo, houve um aumento no teor de sólidos totais para todas as bateladas, resultado da adição da cal (ANDREOLI *et al.*, 2001). A perda de umidade também teve influência no aumento da concentração de sólidos totais, principalmente após 2 dias de experimento. O aumento da concentração de sólidos no decorrer do tempo pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 – Valores médios de sólidos totais (ST) e da relação SV/ST das três repetições de cada dosagem de cal aplicada no decorrer do tempo de higienização



Verifica-se na Figura 14 que a adição de quantidades diferentes de agente alcalinizante teve influência no aumento de sólidos totais. Tal influência foi mais evidenciada no experimento utilizando 40% de cal, com acréscimo de 30,79 a 41,36%

de sólidos em relação ao lodo bruto. Um aumento significativo no teor de sólidos totais em todas as bateladas ocorreu após 30 dias de contato devido à perda de umidade.

As relações entre sólidos voláteis e totais (SV/ST) das bateladas apresentaram comportamentos semelhantes, com valores decrescentes no decorrer do experimento dentro do reator e mantendo-se constante durante a maturação em recipientes abertos. A redução de sólidos voláteis nos processos de higienização com 20 e 30% de cal foram, em média, muito próximas, enquanto a caleação com 40% de cal o decréscimo foi mais evidenciado, cerca de 30,34% do valor inicial.

A redução na relação SV/ST já era esperada. Qasim, (2000) citado por Prim, (2011) relata que a redução da concentração de sólidos voláteis em relação aos sólidos totais é causada pelo incremento no teor de sólidos totais fixos, a matéria orgânica não é destruída. Os valores de SV/ST em todas as bateladas foram inferiores à 70%, evidenciando a estabilidade do lodo.

5.2.4 Teor De Umidade

Os teores de umidade monitorados nas amostras são representados na Figura 15. Os valores correspondem às médias das três repetições de cada dosagem de cal.

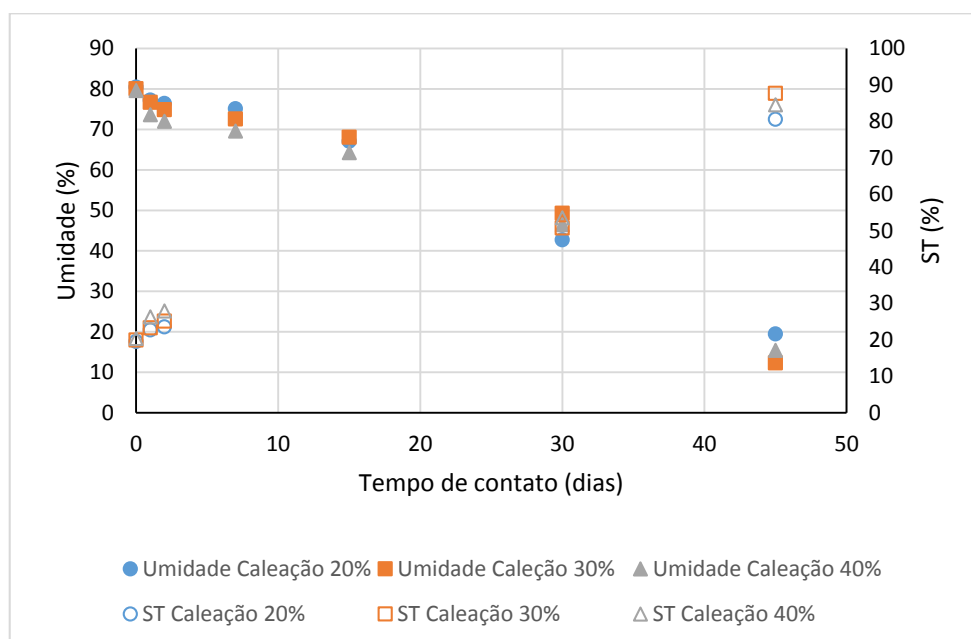
Observou-se uma redução na umidade no decorrer do tempo, apresentando comportamento inverso aos resultados de sólidos totais, atestando a relação direta entre eles. No entanto, não houve uma influência aparente da dosagem de cal aplicada na redução de umidade.

Ao longo dos dois dias de experimento dentro do reator, a perda de umidade foi menos significativa para todas as bateladas, com variações de 4,37 a 7,20%. Uma redução mais expressiva foi observada em 30 dias de contato, com o lodo caleado já armazenado em ambiente em contato com ar atmosférico.

Durante o processo de higienização dentro do reator fechado, observou-se que o vapor d'água presente na atmosfera interna do mesmo condensava na tampa e retornava à massa de lodo. Este fato explica a manutenção da elevada umidade observada durante os tempos de contato de 1 e 2 dias (tempo de higienização dentro do reator).

A redução da umidade foi ocasionada pela perda de água para o ambiente uma vez que, após os dois dias de mistura no reator, o lodo ficava armazenado em bacias abertas para maturação.

Figura 15 – Teores de umidade e concentração de sólidos totais dos tratamentos em função do tempo de mistura e armazenamento



Ilhenfeld, Pegorini e Andreoli (1999), perceberam que a eficiência da caleção era maior quando o lodo se encontrava com teores de umidade entre 65 a 75%, pois esta faixa permite uma boa reação da cal com a água contida no lodo. Resultados semelhantes foram verificados neste experimento, conforme mencionado no item 5.1.1. Lodo com umidade inicial na faixa de 67% atingiu maior temperatura quando comparado ao lodo com umidade inicial de 80%.

A relação entre umidade e elevação do pH não foi estudada nesta pesquisa, no entanto Mader Netto *et al.* (2003) concluíram em seu estudo que a umidade não é um fator relevante nos níveis de pH atingidos no processo.

5.2.5 Nitrogênio

No que se refere ao teor de nitrogênio, tanto do lodo bruto quanto do biossólido, foram analisados os valores de NKT e N-amoniaco. Os resultados estão indicados nas Figuras 16, 17 e 18.

O processo de higienização alcalina de lodos de esgoto provoca perda expressiva do nitrogênio que se encontra na forma amoniaco, por meio da volatilização na forma de amônia livre (ILHENFELD; PEGORINI; ANDREOLI, 1999;

ILHENFELD,1999). Essa perda por volatilização ocorre tanto pela elevação da temperatura como, principalmente, do pH (ILHENFELD, 1999).

Figura 16 – Concentrações de N-Amoniacal e NKT ao longo do tempo para caleação de 20%

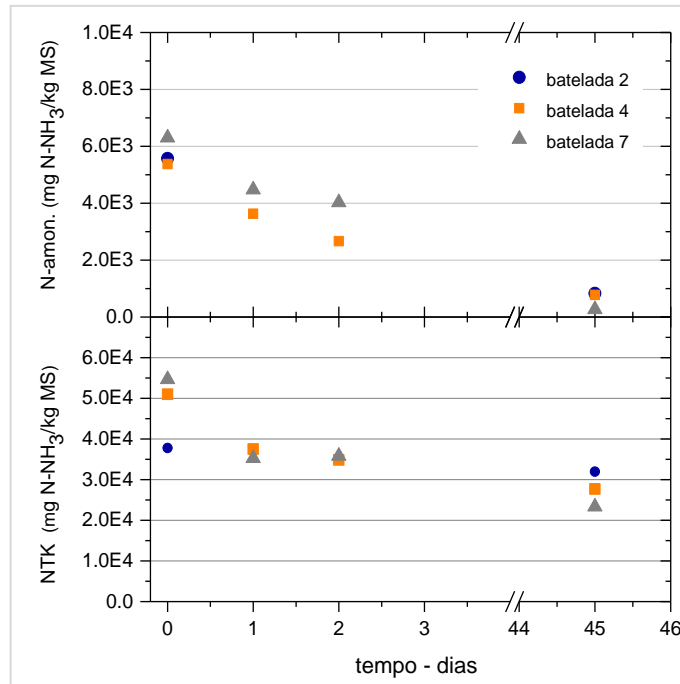


Figura 17 – Concentrações de N-Amoniacal de NKT ao longo do tempo para caleação de 30%

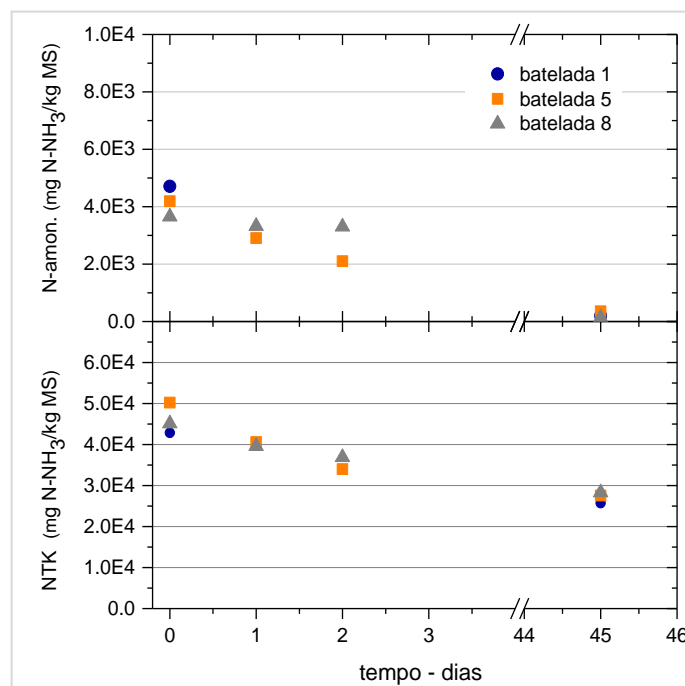
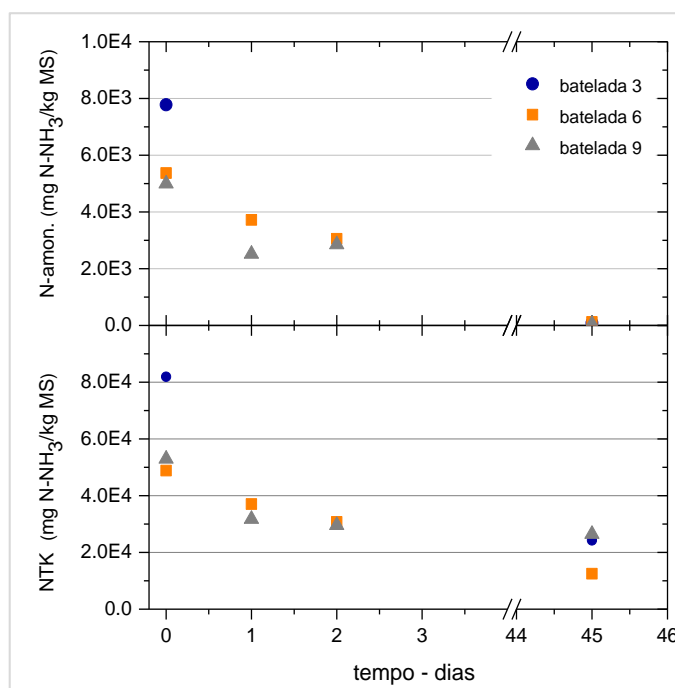


Figura 18 – Concentrações de N-Amoniacal e NKT ao longo do tempo para caleação de 40%



Observando os gráficos das Figuras 16, 17 e 18, notou-se que o decaimento na concentração de NKT apresenta um comportamento semelhante ao decaimento de N-amoniaco do lodo.

Considerando as médias das três repetições de cada dosagem de cal utilizada para higienização em reator fechado, pode-se verificar pela Figura 19 que, à medida que a dosagem de cal aplicada ao lodo aumentou, ocorreu maior redução no teor de NKT do lodo. Aos 45 dias de experimento, a dosagem de 20% e de 30% apresentaram redução de aproximadamente 42% em relação ao NKT do lodo bruto, enquanto que a dosagem de 40% apresentou redução de 66%.

A parcela de NKT removida no processo está relacionada com a parcela de N-amoniaco removida, visto que ao final de 45 dias o nitrogênio no lodo se encontra praticamente na forma orgânica (acima de 98%)

Os valores de N-amoniaco também sofreram decaimento no decorrer do tempo e para dosagens maiores de cal apresentaram maiores reduções de N-amoniaco na massa de lodo. Tal comportamento pode ser observado no gráfico da Figura 20. Os valores plotados correspondem às médias das três repetições de cada dosagem de cal. A redução média de N-amoniaco no lodo para as três dosagens foi acima de 90% sendo maior para a dosagem de 40%, com 99% de redução.

A perda de N-amoniaco da massa de lodo durante os dois dias de experimento dentro do reator foi, em média, de 42,7%, 31% e 43% para as dosagens de cal virgem de 20, 30 e 40%. Nota-se que essa perda de N em apenas 2 dias é grande comparada aos 45 dias, isto porque as principais variáveis condicionantes das perdas de N relacionadas a volatilização da amônia apresentam-se de maneira mais intensa durante a realização do experimento dentro do reator. Andreoli e Carneiro (2002) dizem ainda que o teor de umidade do meio favorece a volatilização da amônia devido às condições propícias para reações químicas e microbianas.

Figura 19 – Média das concentrações de NKT no lodo no decorrer do tempo para os tratamentos com 20%, 30% e 40%

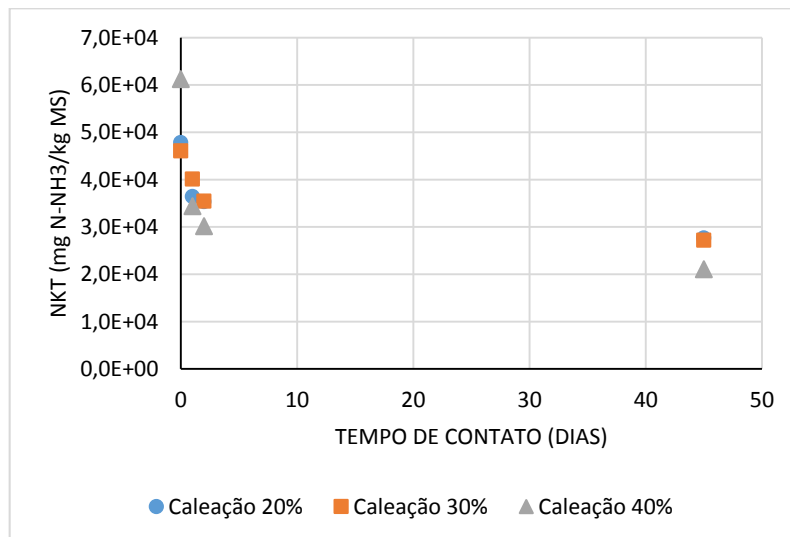
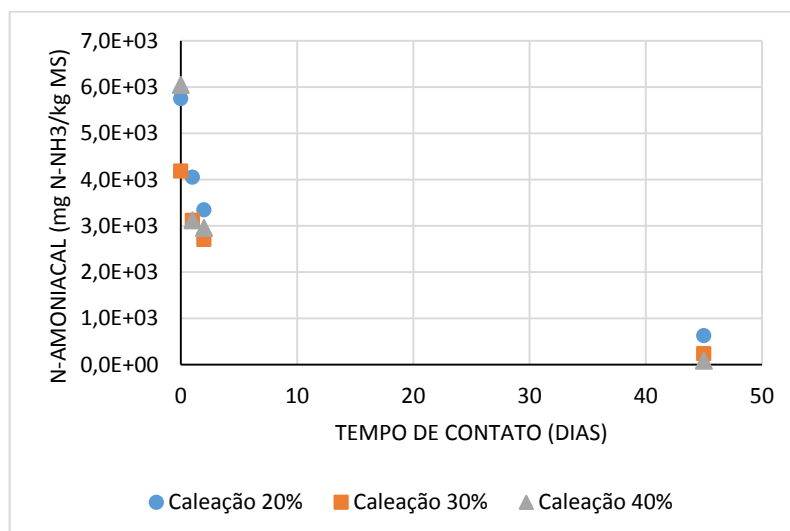


Figura 20 – Média das concentrações de N-Amônico no lodo no decorrer do tempo para os tratamentos com 20%, 30% e 40%



No levantamento realizado por Bittencourt (2014), os lotes de lodo higienizados apresentaram médias de 1% e 0,07% para NKT e N-amoniacoal, respectivamente. Nesta pesquisa, após 45 dias de contato, o lodo apresentou concentrações de NKT entre 2,64 e 2,77% e concentrações de N-amoniacoal entre 0,01 e 0,06%. As menores concentrações de NKT e N-amoniacoal após 45 dias de contato foram observadas para dosagens de cal de 40%, onde ocorre maior volatilização do nitrogênio em forma de amônia.

Uma vez que a presença de nitrogênio no lodo de esgoto é uma das características que possibilitam a utilização deste material na agricultura, a perda expressiva de nitrogênio através do processo de higienização alcalina após os 45 dias de tratamento pode inviabilizar o uso agrônômico. Assim, seria necessário identificar o tempo ótimo de maturação do lodo de modo que este apresente condições sanitárias seguras para aplicação na agricultura e concentração de nitrogênio suficiente para que apresente característica de fertilizante.

5.2.6 Fósforo

A concentração de Fósforo total (P_2O_5) foi analisada no lodo bruto e no lodo caleado com 40% de cal. Para uma melhor representatividade, a amostra de lodo caleado consistiu em uma mistura das três bateladas realizadas com dosagem de cal de 40%. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Concentração de fósforo total do lodo bruto e caleado com 40% de cal

Amostra	Fósforo total (% MS)
Lodo bruto	1,74
Lodo caleado 40% cal	1,14

Observa-se que os resultados foram próximos, provavelmente a diferença entre os resultados da análise de fósforo do lodo bruto e do lodo higienizado deve-se ao aumento na concentração de ST no lodo higienizado, promovendo uma diluição na concentração de fósforo.

5.2.7 Compostos inorgânicos

Dentre os compostos inorgânicos presentes no lodo de esgoto, foram determinadas as concentrações de Cádmio total, Chumbo, Cromo total, Mercúrio total, Níquel total e Selênio total. Assim como o Fósforo, as amostras analisadas foram do lodo bruto e do lodo caleado com 40% de cal. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 21.

Analisando os resultados obtidos e comparando-os com as concentrações máximas permitidas pelas principais normas brasileiras, verificou-se que os valores encontrados estão abaixo dos limites permitidos, indicando que o lodo tratado pode ser utilizado na agricultura sem qualquer restrição no que diz respeito à possível contaminação em relação aos metais analisados.

A redução das concentrações destes compostos em relação ao lodo bruto, assim como o fósforo, é explicada pelo efeito de diluição proporcionado pelo aumento da quantidade de sólidos no lodo tratado.

Tabela 21 – Concentração de compostos inorgânicos do lodo bruto e do lodo caleado com 40% de cal

Amostra	Lodo bruto	Lodo caleado 40%	Limite CONAMA 375/06
Cádmio total (mg/kg MS)	0,58	0,42	39
Chumbo (mg/kg MS)	59,21	32,26	300
Cromo total (mg/kg MS)	93,55	57,08	1000
Mercúrio total (mg/kg MS)	0,00	0,00	17
Níquel total (mg/kg MS)	25,70	16,95	420
Selênio total (mg/kg MS)	0,00	2,22	100

Pires *et. al.* (2007) encontraram concentrações de compostos inorgânicos no lodo de esgoto bruto proveniente de digestor anaeróbico superiores às concentrações encontradas no lodo bruto utilizado nesta pesquisa. As concentrações de cádmio total, chumbo, cromo total e níquel total encontrados pelos autores foram de aproximadamente 11 mg/kg, 206 mg/kg, 791 mg/kg e 395 mg/kg, respectivamente.

Esta diferença está relacionada às características do esgoto sanitário recebido pela estação de tratamento.

5.2.8 Pureza da cal virgem

Com base nos resultados das análises de CaO total e CaO disponível, foi possível classificar a cal virgem utilizada nos experimentos como dolomítica, ou seja, apresenta em sua composição uma parcela de óxido de magnésio (MgO) (ABPC, 1998 apud ANDREOLI *et al.*, 2001).

A cal utilizada apresentou uma concentração de CaO total de 47%, destes 22,5% estava na forma de CaO disponível. Estes resultados, juntamente com os valores de umidade do lodo, justificam a baixa temperatura atingida nos experimentos de caleação. Além disso, o grau de pureza pode ter influenciado também os valores de pH encontrados.

5.3 PARÂMETROS MICROBIOLÓGICOS E PARASITOLÓGICOS

5.3.1 Coliformes Termotolerantes

Os resultados observados em relação à quantificação de coliformes termotolerantes estão apresentados nas Figuras 21, 22 e 23.

Figura 21 – Logaritmo do número mais provável de coliformes termotolerantes (*E. coli*) ao longo do tempo para caleação de 20%

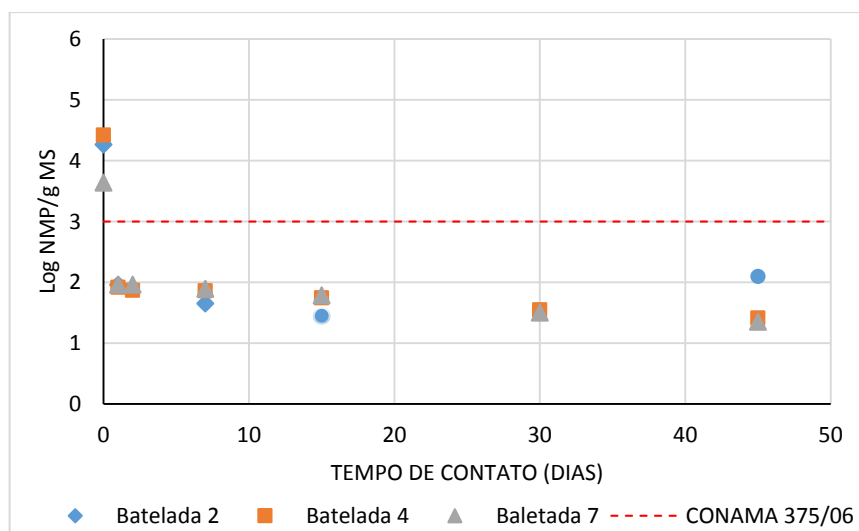


Figura 22 – Logaritmo do número mais provável de coliformes termotolerantes (*E. coli*) ao longo do tempo para caleação de 30%

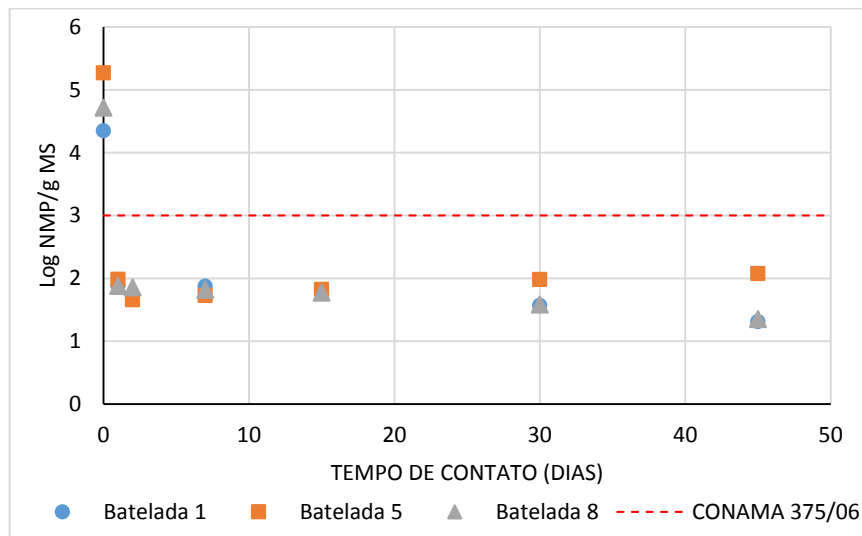
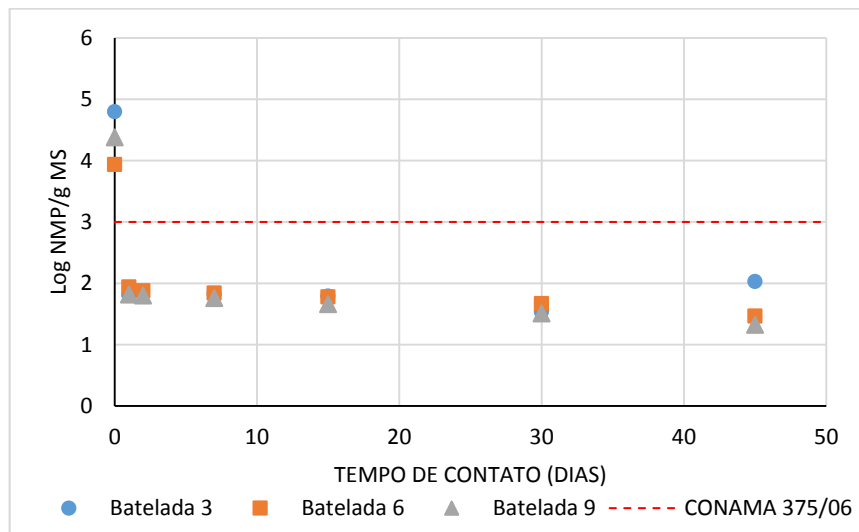


Figura 23 – Logaritmo do número mais provável de coliformes termotolerantes (*E. coli*) ao longo do tempo para a caleação de 40%



Durante o processo de higienização alcalina dentro do reator fechado notou-se que, para todas as dosagens de cal, houve a redução da concentração de coliformes termotolerantes na massa de lodo atingindo valores de log NMP/g MS consideravelmente menores que 3 em 24 horas de mistura. Isto, segundo Barros *et al.* (2006), se deve ao fato de que a alteração do pH do meio e o consequente aumento de temperatura desnaturam os ácidos nucléicos e provocam o rompimento de suas pontes de hidrogênio, exercendo assim ação bactericida. Dessa forma, o

experimento gerou um lodo com características de lodo classe A em termos de coliformes termotolerantes ($< 3 \log \text{NMP/g ST}$).

Passamani, Keller e Gonçalves (2002) observaram, em sua pesquisa de higienização de lodo de esgoto utilizando cal hidratada, o recrescimento de coliformes fecais (termotolerantes) após 30 e 60 dias de armazenamento para os experimentos com dosagens de 30 e 40% respectivamente. Os autores atribuem esse recrescimento à queda de pH observada no período considerado.

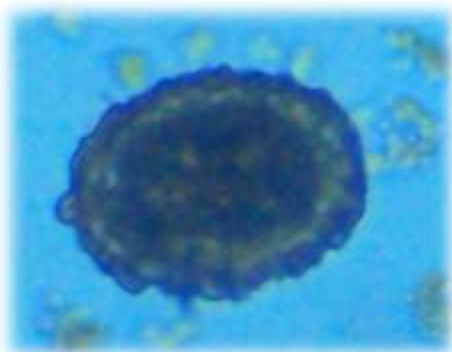
Um crescimento nas concentrações de coliformes também foi observado por Rocha (2009) aos 15 e 30 dias no tratamento com 12,6% de cal e aos 15 dias para os tratamentos cujas dosagens foram 21% e 29,4%. No entanto, os pesquisadores não definiram se foram coliformes totais ou termotolerantes.

Lozada, Madera e Leal (2009) estudaram a eliminação de patógenos em biossólido com dosagens de 9% de cal virgem e concluíram que esta dosagem permitiu a redução total de coliformes termotolerantes em 13 dias de contato.

5.3.2 Ovos De Helminthos

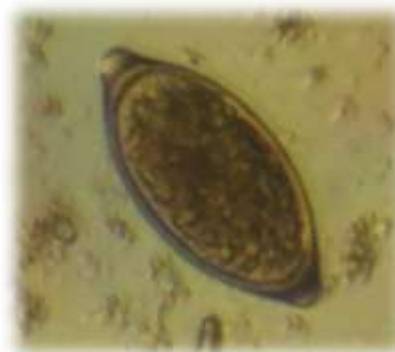
As concentrações de ovos totais e de ovos viáveis de helmintos presentes nos lodos higienizados foram monitoradas ao longo do tempo. Foram observados ovos de helmintos dos gêneros: *Ascaris* sp; *Trichuris* spp; *Capillaria* spp; *Hymenolepis nana* e *Toxocara* sp. As Figuras 24 a 28 mostram os ovos de helmintos observados no lodo de esgoto em microscópio óptico em objetiva 10x.

Figura 24 – Ovo de *Ascaris* sp observado no lodo de esgoto



Fonte: Autor

Figura 25 – Ovo de *Trichuris* sp observado no lodo de esgoto



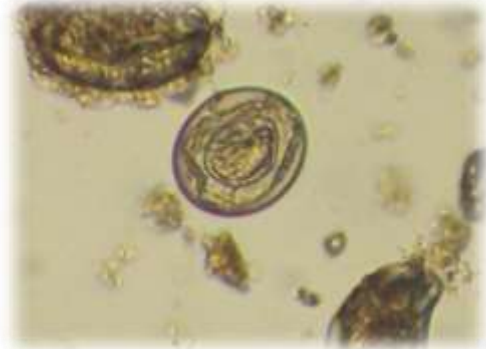
Fonte: Autor

Figura 26 – Ovo larvado de *Capillaria* sp observado no lodo de esgoto



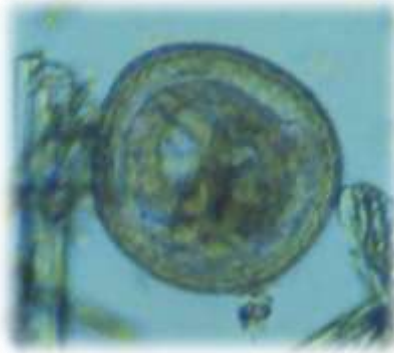
Fonte: Autor

Figura 27 – Ovo de *Hymenolepis nana* observado no lodo de esgoto



Fonte: Autor

Figura 28 – Ovo larvado de *Toxocara* sp observado no lodo de esgoto



Fonte: Autor

As Figuras 29, 30 e 31 representam os valores dos ovos viáveis de helmintos ao longo do tempo para as dosagens de 20%, 30% e 40%, respectivamente. Os resultados estão apresentados também na Tabela 22.

Figura 29 – Viabilidade de ovos viáveis de helmintos por grama de ST ao longo do tempo para os experimentos de caleação com dosagem de 20%

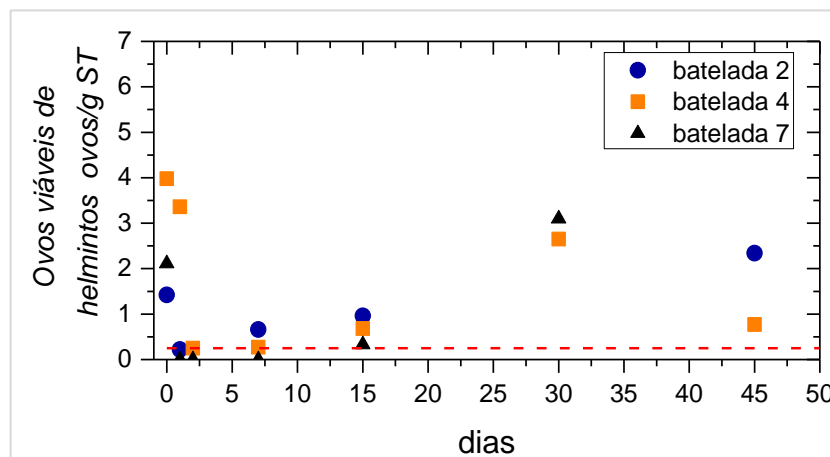


Figura 30 – Viabilidade de ovos viáveis de helmintos por grama de ST ao longo do tempo para os experimentos de caleação com dosagem de 30%

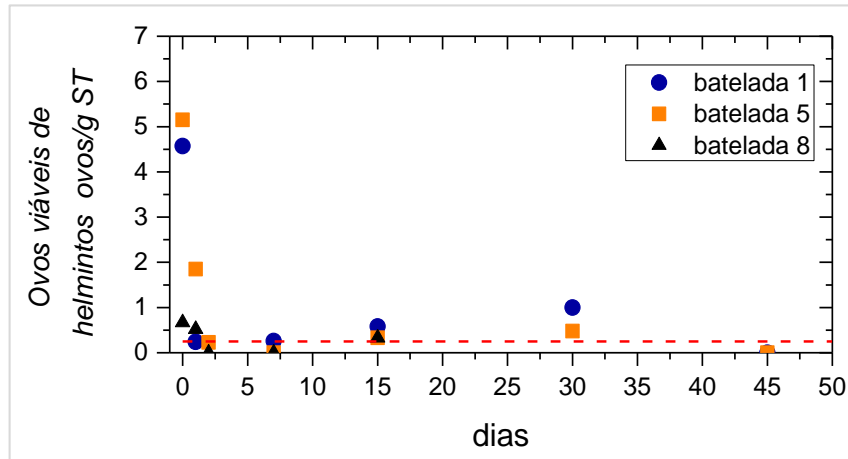


Figura 31 – Viabilidade de ovos viáveis de helmintos por grama de ST ao longo do tempo para os experimentos de caleação com dosagem de 40%

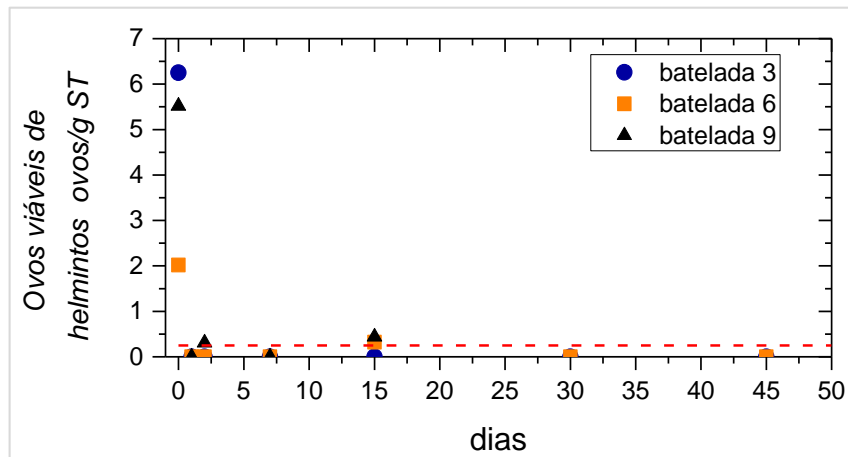


Tabela 22 – Viabilidade de ovos viáveis de helminto por grama de ST para cada batelada

CALEAÇÃO 20% (ovo/g ST)							
Batelada	Tempo de contato (dias)						
	0	1	2	7	15	30	45
Batelada 2	1,42	0,22	NR*	0,66	0,96	NR*	2,34
Batelada 4	3,98	3,36	0,25	0,27	0,68	2,65	0,77
Batelada 7	2,11	0,00	0,00	0,00	0,33	3,10	0,00
CALEAÇÃO 30% (ovo/g ST)							
Batelada	Tempo de contato (dias)						
	0	1	2	7	15	30	45
Batelada 1	4,57	0,24	NR*	0,26	0,58	1,00	0,00
Batelada 5	5,15	1,85	0,23	0,00	0,33	0,48	0,00
Batelada 8	0,67	0,52	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00
CALEAÇÃO 40% (ovo/g ST)							
Batelada	Tempo de contato (dias)						
	0	1	2	7	15	30	45
Batelada 3	6,25	0,00	NR*	0,00	0,00	0,00	0,00
Batelada 6	2,02	0,00	0,00	0,00	0,32	0,00	0,00
Batelada 9	5,52	0,00	0,31	0,00	0,44	0,00	0,00

* Não realizado

Os tratamentos com dosagens de cal de 20% se mostraram menos efetivos na inviabilização dos ovos de helmintos, apresentando quantidades de ovos viáveis consideravelmente acima do limite estabelecido pela resolução CONAMA 375/06 (< 0,25 ovos viáveis/g de ST) mesmo após 45 dias de armazenamento. Isto pode ser explicado devido à redução nos valores de pH ainda na etapa da higienização dentro do reator.

A dosagem de 30% foi mais eficaz no processo de higienização do lodo em relação à dosagem de 20%. Porém, mesmo após 30 dias de contato, a concentração de ovos viáveis se manteve acima da recomendada pela legislação brasileira, período em que os valores de pH apresentaram-se abaixo de 11.

Os tratamentos utilizando dosagens de cal de 40% apresentaram inviabilização dos ovos de helmintos já nas primeiras 24 horas de tratamento e mantiveram-se

inviáveis durante todo o tempo de armazenamento, uma vez que os valores de pH se mantiveram acima de 11,5 em todo o experimento apresentando redução apenas aos 45 dias de contato.

Assim pode-se dizer que houve um efeito significativo da porcentagem de cal aplicada nos resultados de viabilidade dos ovos de helmintos, sendo que maiores quantidades de cal permitiram a manutenção de pH elevados por um período maior de tempo. Dentre as dosagens estudadas, o tratamento com 40% de cal foi o que produziu lodo classe A em termos de redução de patógenos. Segundo Godinho (2003), para que o lodo seja considerado higienizado pela caleação é necessário associar a quantidade de cal adicionada ao tempo de contato decorrido entre lodo e cal.

Soccol *et al.* (1997) submeteram lodo de esgoto com ST inicial de 6,72% ao tratamento com cal na concentração de 50% e 90 dias de armazenamento. Os autores obtiveram percentual de viabilidade de ovos de helmintos equivalente a 0% em 60 dias de contato, resultado que foi confirmado após 90 dias de contato.

Em seus experimentos de caleação em lodos brutos com concentração de ovos viáveis de helmintos de 11,01 ovo/g ST, Rocha (2009) conseguiu reduzir de imediato valores de ovos viáveis de helmintos inferiores ao valor limite (0,25 ovo/g ST) recomendado para lodo tipo A em todos os tratamentos (12,6%, 21% e 29,4% de cal). A inativação de 100% dos ovos viáveis ocorreu após 15 dias de contato.

Considerando que a manutenção do pH acima de 12 a totalidade dos patógenos são eliminados desde que o tempo de ação seja adequado, alguns autores sugerem o armazenamento do lodo caleado por 30 a 90 dias. Segundo eles, este seria o tempo necessário para que se processem todas as reações químicas de estabilização e eliminação dos microrganismos patogênicos de modo a garantir a eficácia do processo de higienização alcalina (ILHENFELD, 1999; ANDREOLI *et al.*, 2001). Todavia, nesta pesquisa, foi necessário apenas 24 horas de contato entre lodo e cal, com uma dosagem de cal de 40% em relação ao teor de sólidos do lodo, para a completa inviabilidade dos ovos de helmintos.

Analisando os resultados obtidos da viabilidade de ovos de helmintos juntamente com os resultados de N-amoniacal, pode-se inferir que este parâmetro pode ter auxiliado na redução dos ovos viáveis durante os dois dias de experimento dentro do reator. Isto porque, o reator fechado mantém a amônia liberada por *stripping* durante a caleação em contato com a massa de lodo, dessa forma o NH₃ penetra na

membrana dos ovos desnaturando as enzimas responsáveis pelo metabolismo do organismo, provocando sua “inativação” (MENDEZ, 2003 apud BARROS, 2006).

5.4 ASPECTOS TECNOLÓGICOS

Com base nos resultados obtidos e no que foi constatado durante a execução dos experimentos e operação do equipamento pode-se dizer que o sistema proposto tem potencial para produzir biossólido de maneira eficiente, com a qualidade sanitária dentro do que a legislação brasileira determina.

Nos processos de higienização de lodo com cal, uma boa homogeneização é de extrema importância na eficiência da higienização, uma vez que, de acordo com Ilhenfeld, Pegorini e Andreoli (1999), pode ocorrer a preservação dos patógenos, ou de suas formas de disseminação, caso haja a presença de torrões de lodo seco cujo interior não teve contato com a cal.

Dessa forma, dentre as vantagens observadas pode-se citar a homogeneização proporcionada pelo misturador mecânico. A utilização desta forma de mistura permitiu que, no tempo de mistura estudado, a cal fosse completamente incorporada à massa de lodo, sem formação de grumos. Porém, tempos de mistura reduzidos não são indicados pois não haverá homogeneização satisfatória, conforme observado na realização do estudo de elevação do pH imediatamente após a adição de cal.

Como desvantagem menciona-se o fato do misturador mecânico utilizado possuir rotação centralizada e as pás do agitador não abrangerem todo o diâmetro do reator. Estas características faziam com que parte da massa de lodo ficasse acumulada nas paredes do reator, assim era necessário a retirada do lodo das laterais manualmente em cada amostragem. Por isso, sugere-se que se utilize um sistema de mistura de forma orbital.

O isolamento térmico utilizado no reator não foi eficiente para a manutenção da temperatura dentro do mesmo, além de ter permitido que a temperatura ambiente interferisse nos resultados. Dessa forma, sugere-se que o isolamento do reator seja melhorado utilizando, ao invés da manta de isolamento térmico comercial, lã de vidro em espessura adequada.

Outra sugestão seria providenciar uma abertura no reator, na qual fosse possível coletar amostras sem a necessidade de abrir completamente o reator, evitando assim a perda da amônia livre presente na atmosfera do sistema.

A fim de adquirir um conhecimento mais abrangente no que diz respeito aos efeitos da amônia no ambiente confinado para a higienização do lodo, a utilização de um sensor para quantificação deste parâmetro na atmosfera interna do reator é um fator a ser considerado. Assim, seria possível obter dados mais precisos no que se refere à perda de nitrogênio, na forma de amônia livre, do lodo devido à caleação e estabelecer a relação entre a concentração de amônia presente no ambiente fechado e a inviabilização de ovos de helmintos.

Por fim, recomenda-se que maior atenção seja dada em relação à cal utilizada nos processos de caleação. Como verificado, a cal virgem não era constituída apenas de calcário, havendo pouca quantidade de óxido de cálcio na forma disponível (22%). Critérios específicos quanto à pureza e qualidade da cal empregada nestes processos deveriam ser considerados como requisitos obrigatórios para aplicação da técnica de caleação para higienização de lodos de esgoto destinados à reciclagem agrícola.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos até o presente momento pode-se concluir que:

- A movimentação intermitente da massa de lodo durante os dois dias de experimento dentro do reator teve influência no aumento de temperatura medida, uma vez que permitiu que a reação exotérmica ocorresse com maior eficiência devido ao maior contato de cal com a umidade do lodo.
- Verificou-se que a elevação de temperatura está relacionada com a umidade inicial do lodo, explicando o fato das temperaturas atingidas durante o experimento permanecerem na ordem de 30°C, para lodo com umidade inicial aproximada de 80%.
- No sistema proposto os níveis de pH não alcançaram valores superiores à 12 imediatamente à adição de cal. No entanto, todas as dosagens estudadas permitem atingir pH equivalente à 12 ou mais, conforme os resultados obtidos em 2 horas, 24 horas e 48 horas de contato. Dentre as concentrações de cal estudadas, a caleação com 40% em relação à massa seca foi a mais eficiente por manter o pH elevado por um período de tempo maior (30 dias).
- Os valores de NKT e N-amoniaco decaíram no decorrer do tempo, apresentando comportamento muito semelhante. Isto leva a conclusão de que a redução nas concentrações de NKT está associada à perda de N-amoniaco por *stripping* da amônia do lodo ocasionado pela elevação de pH.
- Em relação à concentração de fósforo e de compostos inorgânicos (metais) a variação observada entre o lodo bruto e o lodo tratado se deve ao efeito de diluição proporcionado pelo aumento de ST devido à incorporação da massa de cal ao lodo durante o processo.
- As concentrações de coliformes termotolerantes para todos os tratamentos (20%, 30% e 40% de cal) se mantiveram abaixo do limite de 10^3 NMP/g ST ao longo do tempo.
- Em relação à inviabilização dos ovos de helmintos, a aplicação de 40% de cal foi a que se mostrou mais eficiente na redução destes patógenos, atingindo 100% de inviabilização em 24 horas de experimento.
- Considerando os resultados apresentados, conclui-se que o processo de higienização alcalina do lodo caleado a 40% em reator fechado permite obter um

biossólido, em termos sanitários, indicado para aplicação na agricultura (classe A) em um menor tempo de contato.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9648**: Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, nov., 1986.

ABREU, T. A.; GONÇALVES, R. F.; TEIXEIRA, A. V. P.; ROCHA, M. L. de A. F.; ANDRADE, M. C. F. E.; ZANDONADE, E.; CASSINI, S. T. A. Remoção de ovos de helmintos e coliformes fecais de lodos de esgoto através da hidrólise química. In: 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Anais...**, Joinville, 2003.

AISSE, M. M.; VAN HAANDEL, A. C.; VON SPERLING, M.; CAMPOS, J. R.; CORAUCCI FILHO, B.; ALÉM SOBRINHO, P. Tratamento e destino final do lodo gerado em reatores anaeróbios. In: CAMPOS, J.R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. 1ª ed. Rio de Janeiro, RJ: ABES, 1999. p. 271-299.

ALMEIDA, G. C.; FANHANI, J. C.; D'OLIVEIRA, P. S.; DIAS FILHOS, B. P. Eficiência dos processos químico e térmico na higienização de lodo de esgoto. **Iniciação científica CESUMAR**, Maringá, v. 08, n. 01, p. 95-99, jan/jun 2006.

ANDRADE NETO, C. O. de; CAMPOS, J. R. Introdução. In: CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: ABES, 1999, p. 01 - 28.

ANDREOLI, C. V.; PINTO, M. A. T. Processamento de lodos de estações de tratamento de esgotos (ETEs). In: ANDREOLI, C. V. (coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: ABES, 2001, p. 3 – 27.

ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; CHERUBINI, C.; TELES, C. R.; CARNEIRO, C.; FERNANDES, F. Higienização do lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: ABES, 2001, p. 87 – 117.

ANDREOLI, C. V.; CARNEIRO, C. Avaliação do comportamento vertical de nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal e pH em leiras de lodo de esgoto caçado. **Sanare**. v. 18, n 18, p. 63 – 70, 2002.

APHA - American Public Health Association; AWWA - American Water Works Association & WPCF - Water Pollution Control Federation. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21 ed. Washington, DC, 2005.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **Standard guide for alkaline stabilization of wastewater treatment plant residuals**. D6249 – 06, 2006.

BARÉS, M. E.; BRAGA, M. C. B.; AISSE, M. M.; NOYOLA, A.; BRAGA, S. M. Avaliação e definição da melhor relação tempo *versus* temperatura para a remoção de ovos de helmintos e coliformes termotolerantes em reator termohidrolisador. **Revista Científica FAESP**. v. 7, p. 112 – 123, 2011.

BARROS, I. T.; COSTA, A. C. S. da; ANDREOLI, C. V. Avaliação da higienização de lodo de esgoto anaeróbio através do tratamento ácido e alcalino. **Sanare. Revista Técnica da Sanepar**, Curitiba, v. 24, n. 24, p. 61-69, jan/jun. 2006.

BASTOS, V. K. **Deteção e quantificação de ovos viáveis de *Ascaris* sp. e ovos de outros helmintos em lodo de esgoto**. 2012, 81f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

BATISTA, L. F. **Lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos no distrito federal: um estudo de sua aptidão para o condicionamento, utilização e disposição final**. 2015, 197f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

BITTENCOURT, S. **Gestão do processo de uso agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná: aplicabilidade da resolução do CONAMA 375/06**. 2014, 220f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade

Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

CHERNICHARO, C. A. L.; VAN HAANDEL, A.; AISSE, M. M.; CAVALCANTI, P. F. F. Reatores anaeróbios de manta de lodo. In: CAMPO, J. R. (coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: ABES, 1999, p. 155 – 198.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2007, 2ª ed., 380p.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Nº 375, de 29 de agosto de 2006. **Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências**. Diário Oficial da União nº 167, Brasília, DF, 30 ago. 2006, p. 141-146.

CORRÊA, R. S.; FONSECA, Y. M. F.; CORRÊA, A. S. Produção de biossólido agrícola por meio da compostagem e vermicompostagem de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 11, n. 4, p. 420 – 426, jul-ago, 2007.

CUKJATI, N. ZUPANCIC, G. D., ROS, M., GRILC, V. Composting of anaerobic sludge: An economically feasible element of a sustainable sewage sludge management. **Journal of Environmental Management**. v. 106, p. 48-55, 2012.

DIONÍSIO, J. A.; RESSETTI, R. R. Avaliação da capacidade da minhoca *Eisenia fetida* (Savigny, 1826) de desinfecção e desinfestação do lodo de esgoto. **Sanare**. v. 8, n. 8, p. 50 - 55, jul – dez, 1997

ERIKSEN, L.; ANDREASEN, P.; ILSOE, B. Inactivation of *Ascaris suum* eggs during storage in lime treated sewage sludge. **Water Research**. v. 30, n. 4, p. 1026 – 1029, 1995.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual prático para a compostagem de**

biossólidos: lodo. Rio de Janeiro: ABES, 1999, 84p.

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V. Produção e características dos biossólidos. In:_____. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura.** Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, PROSAB. Companhia de Saneamento do Paraná, SANEPAR, Curitiba, PR, 1999. p. 8-17.

FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L.; VAN HAANDEL, A.; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P. F. Fundamentos do tratamento anaeróbio. In: CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo.** 1ª Ed. Rio de Janeiro: ABES, 1999, p. 29-52.

GLÓRIA, N. A. da; DELGADO, A. A. Estudos sobre a neutralização do caldo de cana nas usinas de açúcar. I – Determinação do CaO e MgO totais e CaO disponível da cal. **Anais...** Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 1970, v. 27, p. 49-60.

GODINHO, V. M. **Estudo sobre a ocorrência de ovos de helmintos e viabilidade de *Ascaris* sp em lodos anaeróbios *in natura* e submetidos à higienização por caleação e por tratamento térmico.** 2003, 139f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; VON SPERLING, M. Remoção de umidade de lodos de esgoto. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** 2ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. p. 157-258.

GREGHI, S. de Q. **Avaliação da eficiência de métodos rápidos usados para detecção de coliformes totais e coliformes fecais em amostras de água, em comparação com a técnica de fermentação em tubos múltiplos.** 2005, 104f. Dissertação (Mestrado em Alimentos e Nutrição) – Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2005.

HAGEMANN, S. E. **Apostila de Materiais de construção básicos.** Universidade

Aberta do Brasil, Instituto Federal Sul-rio-grandense. Tecnologias de comunicação e informação nos cursos de graduação. TICS, 2011.

HANDA, R. M.; NOGUEIRA, A. Determinação de pH de amostras de lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V.; BONNET, B. R. P. (Coord.). **Manual de métodos para análises microbiológicas e parasitológicas em reciclagem agrícola de lodo de esgoto**. 2ª ed. Curitiba: SANEPAR, 2000, p. 81 – 82.

HERNANDES, R.; CAZETTA, J. O. Método simples e acessível para determinar amônia livre liberada pela cama aviária. **Revista Brasileira de Zootecnia**. v. 30, n. 3, p. 824 – 829, 2001.

IAPAR. Instituto Agrônomo do Paraná. **Agrometeorologia - Dados diários de Londrina**. 2015. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=2085>>. Acesso em: 12 out. 2015.

ILHENFELD, R. G. K. Higienização do lodo de esgoto. In:_____. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, PROSAB. Companhia de Saneamento do Paraná, SANEPAR, Curitiba, PR, 1999. p. 27 – 40.

ILHENFELD, R. G. K.; PEGORINI, E. S.; ANDREOLI, C. V. Fatores limitantes. In:_____. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, PROSAB. Companhia de Saneamento do Paraná, SANEPAR, Curitiba, PR, 1999. p. 41 - 61

KATO, M. T.; ANDRADE NETO, C. O. de; CHERNICHARO, C. A. de L.; FORESTI, E.; CYBIS, L. F. Configurações de reatores anaeróbios. In: CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: ABES, 1999, p.53-99.

LIMA, A. M.; ANDRADE NETO, C. O.; MELO, J. L. de S.; MELO, H. N. de S. Estudo comparativo entre as técnicas de determinação de coliformes fecais e *Escherichia coli* em águas naturais e residuárias utilizando os métodos da membrana filtrante e do

substrato cromogênico. In: 21º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Anais...**, 2001

LOZADA, P. T.; MADERA, C. A.; LEAL, J. A. S. Eliminación de patógenos em biosólidos por estabilización alcalina. **Acta Agronômica**. v. 58, p. 197 – 205, 2009.

LOZER, J. G. **Desaguamento e higienização de lodo de esgoto utilizando estufa agrícola sobre leitos de secagem**. 2012, 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

LUDUVICE, M. Processos de estabilização de lodos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. p. 121-155.

MADER NETTO, O. S.; ANDREOLI, C. V.; CARNEIRO, C.; TAMANINI, C. R.; FRANÇA, M. Estudo das variações de pH no lodo caleado em função de diferentes dosagens de óxido de cálcio e teores de umidade. In: 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Anais...**, Joinville, 2003.

MALTA, L. R. S.; TSUTIYA, M. T. Otimização da estabilização cálcica do biossólido produzido na ete lavapés de são josé dos campos/sp para uso agrícola. In: 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Anais...**, Joinville, 2003.

MATTANA, A. J. **Estudos de cales hidratadas de mercado – Caracterização química, física e comportamento reológico da pasta**. 2013, 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

McKINLEY, J. W., PARZEN, R. E., GUZMÁN, A. M. Ammonia inactivation of *Ascaris* ova in ecological compost by using urine and ash. **Applied and environmental microbiology**. v. 78, n.15, p. 5133-5137, 2012.

METCALF & EDDY Inc.; **Wastewater engineering: treatment and reuse**. Tata McGraw-Hill Edition, 2003.

MUN, S.; CHO, S-H.; KIM, T-S.; OH, B-T.; YOON, J. Inactivation of *Ascaris* eggs in soil by microwave treatment compared to UV and ozone treatment. **Chemosphere**. v. 77, p. 285-290, 2009.

NASCIMENTO, R.S.; PEREIRA, M. L. F.; CAVALCANTI, P. F. F.; VAN HAANDEL, A. Estabilização anaeróbia de lodo em reatores tipo UASB. In: 21º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Anais...** João Pessoa, 2001.

NUNES, D. G. **Modelagem da autodepuração e qualidade da água do Rio Turvo Sujo**. 2008, 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

OGAWA, L. **Eficácia da compostagem na estabilização do lodo de esgoto com resíduos agroindustriais e urbanos e aplicação dos compostos como condicionante de solo**. 2014, 92f. Tese (Doutorado em Ciência Animal) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

PASSAMANI, F. R. F.; KELLER, R.; GONÇALVES, R. F. Higienização de lodo utilizando caleagem e pasteurização em uma pequena estação de tratamento de esgoto combinando reator UASB e biofiltro aerado submerso. In: 28º CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL. **Anais...**, Cancún, 2002.

PIANA, M. G. **Higienização de lodo de estações de tratamento de esgoto por compostagem termofílica**. 2009, 60f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PINTO, M. T. Higienização de lodos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2ª Ed. Belo

Horizonte: Editora UFMG, 2014, p. 259-295.

PIRES, M. S. G. **Avaliação da presença de patógenos no lodo líquido estabilizado de ETE (processo aeróbio) quando aplicado ao solo arenoso-siltoso.** 2003, 162f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

PIRES, A. M. M.; MARCHI, G.; MATTIAZZO, M. E.; GUILHERME, L. R. G. Organic acids in the rhizosphere and phytoavailability of sewage sludge-borne trace elements. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.** v. 42, n. 7, p. 917 – 924, 2007.

POLPRASERT, C.; VALENCIA, L. G. The inactivation of faecal coliforms and *Ascaris* ova in faeces by lime. **Water Research.** v. 15, p. 31 – 36, 1981.

POPAT, S. C.; YATES, M. V.; DESHUSSES, M. A. Kinetics of inactivation of indicator pathogens during thermophilic anaerobic digestion. **Water Research.** v. 44, p. 5965 – 5972, 2010.

PRIM, E. C. C. **Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto como material de cobertura de aterro sanitário.** 2011, 285f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

ROCHA, A. L. C. L. **Higienização de lodo anaeróbio de esgoto por meio alcalino: Estudo de caso da ETE Lages – Aparecida de Goiânia – GO.** 2009. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2009.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. Calcário e dolomito. In: LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. **Rochas e minerais industriais: usos e especificações.** 1ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. p. 327 – 350.

SAMPAIO, A. de O. Afinal, queremos ou não viabilizar o uso agrícola do lodo produzido em estações de esgoto sanitário? Uma avaliação crítica da Resolução CONAMA 375. **Revista DAE.** n. 193, p. 16 – 27, 2013

SILVA, S. M. C. P. da; FERNANDES, F.; SOCCOL, V. T.; MORITA, D. M. Principais contaminantes do lodo. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. p. 67-119.

SOARES, B. D. **Estudo da produção de óxido de cálcio por calcinação do calcário: caracterização dos sólidos, decomposição térmica e otimização paramétrica**. 2007, 383f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

SOCCOL, V. T.; PAULINO R. C.; CASTRO, E. A. de.; TRACS, J. Eficácia dos diferentes processos de tratamento do lodo na redução da viabilidade de ovos de helmintos. **Sanare**. v. 8, n. 8, p. 24 – 32, jul – dez, 1997.

SOCCOL, V. T.; PAULINO R. C.; CASTRO, E. A. de. Metodologia para análise parasitológica em lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V.; BONNET, B. R. P. (Coord.). **Manual de métodos para análises microbiológicas e parasitológicas em reciclagem agrícola de lodo de esgoto**. 2ª ed. Curitiba: SANEPAR, 2000, p. 27 – 41.

SPINOSA, L. Status and perspectives of sludge management. In: 4ª CANADIAN ORGANIC RESIDUALS AND BIOSOLIDS CONFERENCE. Conference Proceedings – Moving Forward – Wasterwater Biosolids Sustainability – Technical, Managerial and Public Synergy. **Anais...** Moncton, New Brunswic, Canadá, p.24-27. 2007.

SZABOVÁ, E.; JURIS, P.; PAPAJOVÁ, I. Sanitation, composting process in different seasons. *Ascaris suum* as model. **Waste Management**. v. 30, p. 426 – 432, 2010.

TONANI, K. A. A. **Identificação e quantificação de metais pesados, parasitas e bactérias em esgoto bruto e tratado da Estação de Tratamento de Esgoto de Ribeirão Preto – SP**. 2008, 179f. Dissertação (Mestrado em Enfermagem em Saúde Pública) – Escola de Enfermagem de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2008.

USEPA. Environmental Regulations and Technology. **Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge.** EPA/625/R-92/013, 2003.

VAN HAANDEL, A.; CAVALCANTI, P. F. F. Geração e composição de lodos em sistemas de tratamento de esgotos sanitários. In: ANDREOLI, C. V. (coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.** 1ª Ed. Rio de Janeiro: ABES, 2001, p. 03 - 28.

VAN HAANDEL, A.; ALÉM SOBRINHO, P. Produção, Composição e constituição de lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.) **Alternativas de uso de resíduos de saneamento.** 1ª Ed. Rio de Janeiro: ABES, 2006, p. 07-28.

VON SPERLING, M. V. **Introdução à qualidade da água e ao tratamento de esgotos.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2005, 3ª ed., 452p.

VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V. Introdução. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** 2ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. p. 11 – 14.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** 2ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. p. 15-65.

YANKO, W. A. Occurrence of pathogens in distribution and marketing Municipal sludges. In: EPA (1992) **Environmental regulation and technology. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge.** Rapport U.S.EPA 625/R-92/013, p. 149.

APÊNDICE A - Resultados de Temperatura

Tabela A1 – Temperatura do lodo bruto e da mistura lodo + cal durante o tempo de mistura dentro do reator para as bateladas com dosagem de cal de 20%

Tempo de mistura (horas)	Temperatura (°C)		
	Batelada 2	Batelada 4	Batelada 7
0 – Lodo bruto	11,9	17,3	19,8
0,25	16,5	21	26,8
1	18,4	22	25,2
2	19,3	22,8	24,8
3	19,9	23,7	24,1
4	20,5	24,7	23,9
5	21	25,6	23,7
6	21,3	26	23,6
7	21,8	27,2	23,6
8	21,9	27,9	23,7
9	22,2	28,1	23,5
23	22,2	24,8	20
24	22,1	24,7	20
25	22	24,9	20,2
26	21,8	25,3	20,5
27	NR*	25,6	21
28	NR*	26,1	21,6
29	NR*	26,9	22,4
30	NR*	27,4	23
31	NR*	27,7	23,4
32	NR*	28,1	23,8
33	NR*	28,3	24,2
47	NR*	24,1	22,1
48	NR*	23,9	21,8

* Não realizada

Tabela A2 – Temperatura do lodo bruto e da mistura lodo + cal durante o tempo de mistura dentro do reator para as bateladas com dosagem de cal de 30%

Tempo de mistura (horas)	Temperatura (°C)		
	Batelada 1	Batelada 5	Batelada 8
0 – Lodo bruto	7,5	19,9	26,6
0,25	18,5	25,6	31,4
1	18,7	26,8	32
2	NR*	27,6	32,1
3	19,8	28,4	32,3
4	NR*	28,9	32,5
5	22,2	29,6	32,7
6	NR*	30	32,9
7	23,1	30,6	33
8	23,8	30,8	33,2
9	NR*	31	33,3
23	NR*	25,4	27
24	NR*	25,1	26,6
25	NR*	25,2	26,2
26	23,3	25,5	26,4
27	NR*	25,9	26,8
28	NR*	26,2	27,5
29	NR*	26,8	28,1
30	NR*	27,2	28,9
31	NR*	27,8	29,5
32	NR*	28	30,2
33	NR*	28,1	30,6
47	NR*	23,5	26,9
48	NR*	23,2	26,8

* Não realizada

Tabela A3 – Temperatura do lodo bruto e da mistura lodo + cal durante o tempo de mistura dentro do reator para as bateladas com dosagem de cal de 40%

Tempo de mistura (horas)	Temperatura (°C)		
	Batelada 3	Batelada 6	Batelada 9
0 – Lodo bruto	10,4	24,4	21,8
0,25	18,2	32	34,6
1	19,8	33,2	34
2	21,4	33,4	33,3
3	22,4	32,8	32,9
4	23,6	32,8	32,2
5	24,6	32,7	32
6	26	32,6	31,22
7	26,2	32,6	30,9
8	27	32,6	30,6
9	27,3	32,4	30,6
23	26	24,3	24
24	25,8	23,8	23,8
25	25,6	23,9	23,7
26	25,5	24,2	23,7
27	NR*	24,6	24
28	NR*	25,2	24,2
29	NR*	25,7	24,6
30	NR*	26,3	25,1
31	NR*	27	25,5
32	NR*	27,5	25,6
33	NR*	27,6	25,6
47	NR*	23,8	25,7
48	NR*	23,3	23,7

* Não realizada

APÊNDICE B - Resultados de pH

Tabela B1 – Variação de pH observada em cada uma das três bateladas para todas as dosagens de cal testadas

CALEAÇÃO 20%			
Tempo de contato	Batelada 2	Batelada 4	Batelada 7
Bruto	8,98	8,71	8,72
24h	11,89	11,83	12,23
48h	NR*	12,18	11,41
7 dias	10,66	11,43	11,59
15 dias	11,42	11,15	11,38
30 dias	NR*	9,34	8,70
45 dias	8,49	9,30	8,53
CALEAÇÃO 30%			
Tempo de contato	Batelada 1	Batelada 5	Batelada 8
Bruto	8,26	8,34	8,03
24h	12,14	10,77	11,28
48h	NR*	11,39	11,81
7 dias	10,93	12,04	11,80
15 dias	12,68	11,45	11,37
30 dias	9,42	10,89	10,49
45 dias	8,39	9,02	8,85
CALEAÇÃO 40%			
Tempo de contato	Batelada 3	Batelada 6	Batelada 9
Bruto	8,94	8,07	8,19
24h	13,15	11,15	11,72
48h	NR*	11,87	11,45
7 dias	12,17	11,75	11,50
15 dias	12,31	11,61	11,69
30 dias	11,66	11,89	11,94
45 dias	9,62	9,87	9,78

* Não realizada

APÊNDICE C - Resultados de NKT e N-Amoniacal

Tabela C1 – Concentração de NKT no decorrer do tempo para cada batelada

CALEAÇÃO 20%			
Tempo de contato	NKT (mg N-NH₃/kg MS de lodo)		
	Batelada 2	Batelada 4	Batelada 7
Bruto	3,78 x 10 ⁴	5,10 x 10 ⁴	5,47 x 10 ⁴
24h	NR*	3,75 x 10 ⁴	3,53 x 10 ⁴
48h	NR*	3,48 x 10 ⁴	3,58 x 10 ⁴
45 dias	3,20 x 10 ⁴	2,77 x 10 ⁴	2,33 x 10 ⁴
CALEAÇÃO 30%			
Tempo de contato	NKT (mg N-NH₃/kg MS de lodo)		
	Batelada 1	Batelada 5	Batelada 8
Bruto	4,29 x 10 ⁴	5,02 x 10 ⁴	4,51 x 10 ⁴
24h	NR*	4,06 x 10 ⁴	3,96 x 10 ⁴
48h	NR*	3,40 x 10 ⁴	3,69 x 10 ⁴
45 dias	2,57 x 10 ⁴	2,75 x 10 ⁴	2,83 x 10 ⁴
CALEAÇÃO 40%			
Tempo de contato	NKT (mg N-NH₃/kg MS de lodo)		
	Batelada 3	Batelada 6	Batelada 9
Bruto	8,19 x 10 ⁴	4,88 x 10 ⁴	5,29 x 10 ⁴
24h	NR*	3,70 x 10 ⁴	3,18 x 10 ⁴
48h	NR*	3,07 x 10 ⁴	2,96 x 10 ⁴
45 dias	2,42 x 10 ⁴	1,25 x 10 ⁴	2,64 x 10 ⁴

* Não realizada

Tabela C2 – Concentração de N-Amoniacal no decorrer do tempo para cada batelada

CALEAÇÃO 20%			
Tempo de contato	N-amoniacoal (mg N-NH₃/kg MS de lodo)		
	Batelada 2	Batelada 4	Batelada 7
Bruto	5,57 x 10 ³	5,38 x 10 ³	6,30 x 10 ³
24h	NR*	3,63 x 10 ³	4,48 x 10 ³
48h	NR*	2,67 x 10 ³	4,02 x 10 ³
45 dias	8,28 x 10 ²	7,76 x 10 ²	2,71 x 10 ²
CALEAÇÃO 30%			
Tempo de contato	N-amoniacoal (mg N-NH₃/kg MS de lodo)		
	Batelada 1	Batelada 5	Batelada 8
Bruto	4,71 x 10 ³	4,19 x 10 ³	3,65 x 10 ³
24h	NR*	2,91 x 10 ³	3,32 x 10 ³
48h	NR*	2,10 x 10 ³	3,30 x 10 ³
45 dias	2,03 x 10 ²	3,55 x 10 ²	1,39 x 10 ²
CALEAÇÃO 40%			
Tempo de contato	N-amoniacoal (mg N-NH₃/kg MS de lodo)		
	Batelada 3	Batelada 6	Batelada 9
Bruto	7,78 x 10 ³	5,37 x 10 ³	4,99 x 10 ³
24h	NR*	3,72 x 10 ³	2,52 x 10 ³
48h	NR*	3,05 x 10 ³	2,85 x 10 ³
45 dias	8,27 x 10 ²	1,23 x 10 ²	4,86 x 10 ²

* Não realizada

Tabela C3 – Concentração de Nitrogênio orgânico no decorrer do tempo para cada batelada

CALEAÇÃO 20%			
Tempo de contato	Nitrogênio orgânico (mg N-NH₃/kg MS de lodo)		
	Batelada 2	Batelada 4	Batelada 7
Bruto	3,22 x 10 ⁴	4,56 x 10 ⁴	4,84 x 10 ⁴
24h	NR*	3,39 x 10 ⁴	3,08 x 10 ⁴
48h	NR*	3,22 x 10 ⁴	3,18 x 10 ⁴
45 dias	3,11 x 10 ⁴	2,69 x 10 ⁴	2,31 x 10 ⁴
CALEAÇÃO 30%			
Tempo de contato	N-amoniacal (mg N-NH₃/kg MS de lodo)		
	Batelada 1	Batelada 5	Batelada 8
Bruto	3,82 x 10 ⁴	4,60 x 10 ⁴	4,15 x 10 ⁴
24h	NR*	3,77 x 10 ⁴	3,63 x 10 ⁴
48h	NR*	3,19 x 10 ⁴	3,36 x 10 ⁴
45 dias	2,55 x 10 ⁴	2,72 x 10 ⁴	2,82 x 10 ⁴
CALEAÇÃO 40%			
Tempo de contato	N-amoniacal (mg N-NH₃/kg MS de lodo)		
	Batelada 3	Batelada 6	Batelada 9
Bruto	7,41 x 10 ⁴	4,35 x 10 ⁴	4,80 x 10 ⁴
24h	NR*	3,33 x 10 ⁴	2,92 x 10 ⁴
48h	NR*	2,77 x 10 ⁴	2,67 x 10 ⁴
45 dias	2,41 x 10 ⁴	1,24 x 10 ⁴	2,64 x 10 ⁴

* Não realizada

APÊNDICE D - Resultados dos parâmetros bacteriológicos

Tabela D1 – Log NMP de coliformes totais de acordo com as dosagens de cal

CALEAÇÃO 20%			
Tempo de contato	Coliformes totais (log NMP/g MS de lodo)		
	Batelada 2	Batelada 4	Batelada 7
Bruto	5,18	6,13	5,36
24h	3,35	3,71	1,96
48h	NR*	1,87	1,96
7 dias	2,27	1,86	1,89
15 dias	2,17	1,74	1,79
30 dias	NR*	1,55	1,50
45 dias	2,10	1,41	1,35
CALEAÇÃO 30%			
Tempo de contato	Coliformes totais (NMP/g MS de lodo)		
	Batelada 1	Batelada 5	Batelada 8
Bruto	5,41	5,81	6,23
24h	1,89	1,99	1,88
48h	NR*	1,66	1,86
7 dias	1,88	1,73	1,82
15 dias	1,81	1,82	1,77
30 dias	1,57	1,98	1,59
45 dias	2,24	2,69	1,35
CALEAÇÃO 40%			
Tempo de contato	Coliformes totais (NMP/g MS de lodo)		
	Batelada 3	Batelada 6	Batelada 9
Bruto	6,59	5,58	5,95
24h	1,81	1,94	2,62
48h	NR*	1,88	1,80
7 dias	1,83	1,84	1,76
15 dias	1,79	1,78	1,66
30 dias	1,54	1,67	1,51
45 dias	2,83	1,96	1,32

Tabela D2 – Log NMP de coliformes termotolerantes (*E. coli*) de acordo com as dosagens de cal

CALEAÇÃO 20%			
Tempo de contato	Coliformes termotolerantes (log NMP/g MS de lodo)		
	Batelada 2	Batelada 4	Batelada 7
Bruto	4,26	4,42	3,64
24h	1,96	1,92	1,96
48h	NR*	1,87	1,96
7 dias	1,65	1,86	1,89
15 dias	1,45	1,74	1,79
30 dias	NR*	1,55	1,50
45 dias	2,10	0,15	1,35

CALEAÇÃO 30%			
Tempo de contato	Coliformes termotolerantes (NMP/g MS de lodo)		
	Batelada 1	Batelada 5	Batelada 8
Bruto	4,35	5,27	4,72
24h	1,89	1,99	1,88
48h	NR*	1,66	1,86
7 dias	0,27	0,24	1,82
15 dias	0,26	0,26	1,77
30 dias	0,20	0,30	1,59
45 dias	1,31	2,08	1,35

CALEAÇÃO 40%			
Tempo de contato	Coliformes termotolerantes (NMP/g MS de lodo)		
	Batelada 3	Batelada 6	Batelada 9
Bruto	4,80	3,94	4,38
24h	0,26	0,29	1,82
48h	NR*	0,27	1,80
7 dias	0,26	0,27	1,76
15 dias	0,25	0,25	1,66
30 dias	0,19	0,22	1,51
45 dias	2,03	1,46	1,32

* Não realizada