

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

**EFEITO DA TAXA DE AERAÇÃO, DA PROPORÇÃO MÁSSICA E DA
UMIDADE DA MATRIZ INICIAL NO PROCESSO DE BIOSSECAGEM DE
LODO ANAERÓBIO**

Marina da Costa Ribeiro de Almeida

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Cali Laguna Achon

Co-orientador: Prof. Dr. Renan Felicio dos Reis

São Carlos

2020

MARINA DA COSTA RIBEIRO DE ALMEIDA

EFEITO DA TAXA DE AERAÇÃO, DA PROPORÇÃO MÁSSICA E DA UMIDADE DA MATRIZ INICIAL NO PROCESSO DE BIOSSECAGEM DE LODO ANAERÓBIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana – PPGEU da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Engenharia Urbana.

ORIENTADORA: Prof^a. Dr^a. Cali Laguna Achon

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Renan Felicio Dos Reis

São Carlos-SP
2020

Almeida, Marina da Costa Ribeiro de

Efeito da taxa de aeração, da proporção mássica e da umidade da matriz inicial no processo de biossecagem de lodo anaeróbio / Marina da Costa Ribeiro de Almeida - - 2020.
166f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos
Orientador (a): Cali Laguna Achon
Banca Examinadora: Cali Laguna Achon, Marcelo Zaiat, Jorge Akutsu
Bibliografia

1. Lodo de estação de tratamento de esgoto. 2. Biossecagem. 3. Biocombustível. I. Almeida, Marina da Costa Ribeiro de. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Marina da Costa Ribeiro de Almeida, realizada em 17/04/2020.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Cali Laguna Achon (UFSCar)

Prof. Dr. Marcelo Zaiat (USP)

Prof. Dr. Jorge Akutsu (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

*Dedico essa dissertação a todas e todos que
trabalham em prol da universalização do
saneamento básico no Brasil.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Cali pela orientação, suporte, ensinamentos e amizade durante todo o mestrado, além de ser uma constante fonte de entusiasmo pela pesquisa e uma referência enquanto pessoa, pesquisadora e professora universitária.

Ao meu coorientador Renan por todo incentivo, fomento às reflexões, ensinamentos e suporte.

Aos trabalhadores da Estação de Tratamento de Esgotos que auxiliaram na coleta do lodo.

Aos funcionários, terceirizados ou não, da UFSCar, que garantiram e garantem a manutenção, gestão e funcionamento adequado da universidade. Em especial aos técnicos Bio e Marcão e à professora Marcilene por todo auxílio técnico, essenciais para a realização da minha pesquisa.

Ao Alex, secretário do PPGEU, que se tornou um grande amigo, me auxiliando e confortando ao longo do mestrado, além de proporcionar excelentes conversas.

Aos cientistas, mestrandos e doutorandos, do PPGEU, principalmente a minha turma de mestrado e do grupo de pesquisa, pelas discussões com diferentes pontos de vistas e pela ajuda durante esse período, em específico ao Matheus, à Ana Flávia, à Luana e ao Alysson.

Ao professor Cordeiro por apresentar novas perspectivas sobre Saneamento Ambiental e Gestão de Pessoas, além de demonstrar paixão e dedicação pelo ensino e pesquisa e ser fonte de inspiração à forma de ensinar e construir o conhecimento.

À Nati, companheira de turma e grande amiga, pelas conversas, jantares, conforto e apoio.

A todos que auxiliaram de alguma forma com questões teóricas ou práticas, em especial à Carol, Lost, Malta, meu irmão Bruno, Luana Pontinha, pelas discussões as quais tornaram esse trabalho possível.

À minha mãe, Mônica, por todo amor, confiança e incentivo ao longo de todo o mestrado.

À minha família pelo apoio, incentivo e conforto sendo fundamentais na minha vida, em especial aos meus irmãos Bruno e Vinícius, à Tia Márcia, à Tia Fuca, ao Peixe e ao meu pai, José Eduardo.

Aos meus amigos pelo apoio incondicional e emocional durante todo esse processo em especial à Melina, Carol, Lost, Amandinha, Bia, Du, Malta, Leo, Nati Cruz.

Ao DJ pelo companheirismo e incentivo durante todo o mestrado.

À SHS consultoria e projetos de engenharia, em especial a Paloma, a Larissa e a Lívia, por me incentivarem a fazer o mestrado e pelo manejo dos horários que possibilitaram a participação em atividades acadêmicas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pela concessão de bolsa de mestrado.

“Graças ao capitalismo do final do século 20, herdamos economias que se fixam no dinheiro como métrica de sucesso e o crescimento sem fim como caminho de progresso. O dano causado por esse modelo restrito — em termos de profundas desigualdades sociais e colapso ecológico — está agora levando muitas pessoas a buscar um novo paradigma.

Um paradigma que começa não com dinheiro, mas com a métrica da vida medida em seus próprios termos: pessoas e comunidades saudáveis, com um clima planetário estável e ecossistemas prósperos. E com isso, a própria forma de progresso muda, do crescimento sem fim para o equilíbrio.”

Kate Raworth (CASTRO, 2019).

ALMEIDA, M. C. R., **Efeito da taxa de aeração, da proporção mássica e da umidade da matriz inicial no processo de biossecagem de lodo anaeróbio**. São Carlos, 2020. 166p. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana – PPGEU, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2020.

RESUMO

A biossecagem (*biodrying*) é uma tecnologia que visa o aproveitamento energético do lodo de esgoto, transformando-o em biocombustível, removendo sua umidade por meio do calor metabólico microbiano, gerado durante a degradação aeróbia da matéria orgânica, e da aeração forçada. A biossecagem é influenciada pelas características e quantidades de microrganismos presentes na matriz, assim como pelas características do meio: oxigênio, umidade e disponibilidade de nutrientes, e pelos procedimentos operacionais. A matriz inicial da biossecagem é composta por lodo de esgoto e por *bulking agents*, que tem como função estruturar a matriz, ser fonte de nutrientes e corrigir a umidade da matriz inicial. O objetivo deste trabalho foi analisar os processos e as operações que envolvem a biossecagem do lodo anaeróbio e avaliar a influência da taxa de aeração, da proporção mássica e da umidade da matriz inicial no processo de biossecagem. Para isso foi realizada uma análise bibliométrica e o estudo dos artigos, que culminou na sistematização e na análise dos processos e das operações que envolvem a biossecagem do lodo de esgoto. Além disso, foram realizados oito ensaios de biossecagem em laboratório com durações de 16, 20 e 24 dias. A aeração forçada foi contínua (constante ou variável) em todos os ensaios. A taxa de aeração contínua e constante dos Ensaios 1 e 2 foi de $1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$, dos Ensaios 5, 7 e 8 foi de $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$ e do Ensaio 6 foi de $3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$. A taxa de aeração dos Ensaios 3 e 4 foi contínua e variável, sendo de, respectivamente, 1 e $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$ no início do ensaio até o 20º dia, quando ambas taxas foram aumentadas para $3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$ e no 22º dia aumentou-se novamente as taxas para $4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$. A matriz inicial da série de quatro ensaios com lodo (ensaios 1, 2, 7 e 8) foi composta por lodo e *bulking agents* (serragem e ração) e a matriz da série dos quatro ensaios sem lodo (ensaios 3, 4, 5 a 6) foram compostas apenas por serragem e ração. O revolvimento da matriz foi feito manualmente; nos Ensaios 1 e 2 a cada 4 dias e nos demais ensaios de acordo com a evolução da temperatura. Verificou-se que lodo anaeróbio desaguado em sistema mecânico possui baixo poder calorífico inferior (PCI) na base úmida ($845 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), sendo necessário processos, como a biossecagem, para viabilizar seu uso energético. Os ensaios 7 e 8 obtiveram os melhores resultados, atingindo a fase termofílica, reduzindo a umidade de 62,33 e 61,48% para 46,73 e 29,36% e reduzindo a massa em 48,47 e 60,09%, respectivamente. O produto do Ensaio 8 resultou em menor umidade e maior poder calorífico (PCI b.u. de $10.083 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), sendo que este resíduo biosseco foi considerado mais viável para o uso energético. Dessa forma, concluiu-se que valores de umidade da matriz inicial próximos a 60%, taxa de aeração superiores ou iguais a $2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$ e proporção mássica de 6:1:5 (lodo:serragem:ração) apresentarem resultados melhores em termos de elevação de temperatura e redução de massa e de umidade.

Palavras-chave: Biossecagem. Lodo de esgoto. Proporção mássica. Taxa de aeração. Umidade da matriz.

ALMEIDA, M. C. R., **Effect of aeration rate, mass ratio, and initial matrix moisture content on anaerobic sewage sludge biodrying**. São Carlos, 2020. 166p. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana – PPGEU, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2020.

ABSTRACT

Biodrying is a novel technology that uses dewatered sewage sludge to generate energy. Microbial metabolic heat, which is produced during aerobic degradation of organic matter, and forced aeration turn the sludge into biofuel by removing moisture content. The treatment process is affected by the following characteristics: the number of microorganisms within the matrix, oxygen content, moisture content, and nutrient availability in the substrate, and the performance of the operational procedures. The initial biodrying matrix comprises sewage sludge and bulking agents (sawdust and feed), which operate in structuring, nutrition, and moisture content correction. The goal of this study was to analyze the biodrying treatment processes and operations as well as to evaluate the influence of aeration rate, mass ratio, and moisture content in the initial matrix. Bibliometric analysis and papers study drove the arrangements and analysis processes. Eight biodrying trials were carried out in the laboratory on different durations (16, 20, and 24 days). Trials 1, 2, 7, and 8 contained both sludge and bulking agents, while trials 3, 4, 5, and 6 had only bulking agents. The biodrying matrix was mixed manually in Trials 1 and 2 every four days and in the others trials according to the temperature decrease. Forced aeration was continuous (constant or variable) in all trials. The continuous and constant aeration rate for Trials 1 and 2 was $1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgTS}^{-1}$; for Trials 5, 7, and 8 was $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgTS}^{-1}$; and for Trial 6 was $3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgTS}^{-1}$. The aeration rate (continuous and variable) for Trials 3 and 4 was 1 and $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgTS}^{-1}$, respectively. Both aeration rates were raised to $3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgTS}^{-1}$ on day 20. On day 22, the rates were raised again to $4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgTS}^{-1}$. It was found that anaerobic sludge dewatered in a mechanical system has a low Lower Heating Value (LHV) on a wet basis ($845 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), thus requiring treatment processes such as biodrying to enable its energy use. Trials 7 and 8 achieved the most efficient results, reaching the thermophilic phase, reducing the moisture content from 62.33 and 61.48% to 46.73 and 29.36%, and reducing the mass by 48.47 and 60.09%, respectively. Trial 8 achieved the lowest moisture content and the highest LHV on a wet basis ($10,083 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), making it the most feasible condition for energy use. In conclusion, the initial matrix moisture content around 60%, aeration rate greater than or equal to $2.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgTS}^{-1}$, and mass proportion of 6:1:5 (sludge:sawdust:feed) present better results involving temperature range and reduction of mass and moisture content, and therefore sewage sludge energy use.

Keyword: Biodrying. Sewage sludge. Matrix ratio. Aeration rate. Moisture content.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 3.1 – Etapas do gerenciamento do lodo e principais processos utilizados | 40 |
| Figura 3.2 – Fluxograma do processo genérico de tratamento e manejo do lodo de ETE | 41 |
| Figura 3.3 – Representação e descrição das etapas do tratamento do lodo de ETE no que se refere à remoção de água..... | 42 |
| Figura 3.4 – Formas de avaliação do processo da biossecagem do lodo de ETE de acordo com 5 grupos gerais e suas respectivas métricas de análise | 46 |
| Figura 3.5 – Perfil da temperatura da biossecagem no estudo de Zhao et al. (2010) | 47 |
| Figura 3.6 – Perfil da temperatura da biossecagem no estudo de Cai et al. (2017, 2018b) | 48 |
| Figura 3.7 – Perfil da temperatura da biossecagem no estudo de Wu et al. (2018) | 49 |
| Figura 3.8 – Perfil da temperatura da biossecagem no estudo de Yang, Zhang e Jahng (2014) | 49 |
| Figura 3.9 – Perfil da temperatura da biossecagem no estudo de Winkler et al. (2013).... | 50 |
| Figura 3.10 – Perfil da temperatura da biossecagem no estudo de Hao, Yang e Jahng (2018) | 51 |
| Figura 3.11 – Esquema das principais características do meio que influenciam o processo biológico da biossecagem do lodo de ETE e seus respectivos fatores | 58 |
| Figura 3.12 – Representação da matriz da biossecagem com umidade elevada e com umidade ótima | 61 |
| Figura 3.13 – Esquema do consumo e da dissipação de energia gerada pelas reações biológicas no processo de biossecagem do lodo de ETE..... | 66 |
| Figura 3.14 – Evolução do número de publicações sobre biossecagem de lodo de esgoto em 24 anos, desde 1996 | 88 |
| Figura 3.15 – <i>Ranking</i> dos 10 países que mais publicam sobre biossecagem de lodo de ETE no período de 24 anos, entre 1996 e 2019 | 89 |
| Figura 3.16 – Rede de colaboração entre países nas publicações sobre biossecagem do lodo de ETE desde 1996 | 90 |
| Figura 4.1 – Fluxograma das etapas desta pesquisa | 91 |
| Figura 4.2 – Lodo desaguado utilizado nos ensaios de biossecagem, coletado na caçamba da ETE | 93 |
| Figura 4.3 – Diagrama dos processos e operações da ETE onde foi coletado o lodo desaguado | 93 |
| Figura 4.4 – Equipamentos utilizados para peneirar a serragem..... | 94 |
| Figura 4.5 – Serragem utilizada nos ensaios de biossecagem..... | 94 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.6 – Ração utilizada nos ensaios de biossecagem | 95 |
| Figura 4.7 – Desumidificador do ar de entrada (sílica gel) do sistema de biossecagem ... | 96 |
| Figura 4.8 – Esquema da instalação do sistema de biossecagem | 97 |
| Figura 4.9 – Reator utilizado no sistema de biossecagem, com detalhe da parte superior (tampa) dos pontos para entrada e saída de ar e conexão do sensor de temperatura no centro..... | 97 |
| Figura 4.10 – Esponja na parte superior do reator do sistema de biossecagem usada nos Ensaio 1 e 2..... | 98 |
| Figura 4.11 – Diagrama da composição da massa total da matriz ou removida durante a biossecagem..... | 102 |
| Figura 5.1 – Temperatura da matriz ao longo dos ensaios de biossecagem – Série com lodo..... | 110 |
| Figura 5.2 – Temperatura da matriz ao longo dos ensaios de biossecagem – Série sem lodo..... | 110 |
| Figura 5.3 – Umidade da matriz ao longo dos ensaios de biossecagem..... | 117 |
| Figura 5.4 – Sólidos Voláteis da matriz ao longo dos ensaios de biossecagem..... | 118 |
| Figura 5.5 – pH da matriz ao longo dos ensaios de biossecagem..... | 120 |
| Figura 5.6 – Densidade, em g.cm ⁻³ , da matriz ao longo dos ensaios de biossecagem ... | 120 |
| Figura 5.7 – FAS da matriz ao longo dos ensaios de biossecagem | 122 |
| Figura 5.8 – Redução mássica total, massa de água, de ST, de SV e de SF da matriz do Ensaio 1 | 124 |
| Figura 5.9 – Redução mássica total, umidade, ST, SV e SF da matriz do Ensaio 2 | 125 |
| Figura 5.10 – Redução mássica total, umidade, ST, SV e SF da matriz do Ensaio 3 | 126 |
| Figura 5.11 – Redução mássica total, umidade, ST, SV e SF da matriz do Ensaio 4 | 127 |
| Figura 5.12 – Redução mássica total, umidade, ST, SV e SF da matriz do Ensaio 5 | 128 |
| Figura 5.13 – Redução mássica total, umidade, ST, SV e SF da matriz do Ensaio 6 | 129 |
| Figura 5.14 – Redução mássica total, umidade, ST, SV e SF da matriz do Ensaio 7 | 130 |
| Figura 5.15 – Redução mássica total, umidade, ST, SV e SF da matriz do Ensaio 8 | 131 |
| Figura 5.16 – Temperatura, ST e massa total da matriz dos Ensaio 3, 4 e 6 | 135 |
| Figura 5.17 – Massa total da matriz e taxa de aeração dos Ensaio 3, 4 e 6..... | 135 |
| Figura 5.18 – Temperatura, ST e massa total da matriz dos Ensaio 1 e 2 | 137 |
| Figura 5.19 – Temperatura, ST e massa total da matriz dos Ensaio 7 e 8 | 137 |
| Figura 5.20 – Temperatura, ST e massa total da matriz dos Ensaio 4 e 5 | 139 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|-----|
| Quadro 3.1 – Tipo de lodo e sua origem nas ETEs | 38 |
| Quadro 3.2 – Composição físico-química do lodo de esgotos de acordo com o tipo de tratamento do esgoto (anaeróbio e aeróbio)..... | 39 |
| Quadro 3.3 – Caracterização físico-química do lodo de esgoto de diferentes ETEs | 39 |
| Quadro 3.4 – Índice de Biossecagem nas pesquisas entre 2010 e 2018 | 52 |
| Quadro 3.5 – Caracterização físico-química do produto do processo de biossecagem presente nas pesquisas | 54 |
| Quadro 3.6 – Equações utilizadas para o cálculo de massa de água removida pela evaporação | 64 |
| Quadro 3.7 – Equações utilizadas para o cálculo da energia consumida..... | 68 |
| Quadro 3.8 – Equações utilizadas para o cálculo da energia dissipada | 69 |
| Quadro 3.9 – Origem do lodo utilizado nas pesquisas de biossecagem | 71 |
| Quadro 3.10 – Caracterização físico-química do lodo utilizado nas pesquisas de biossecagem..... | 73 |
| Quadro 3.11 – Características da matéria orgânica dissolvida e dos elementos do lodo utilizado na pesquisa realizada por Hao, Yang e Jahng (2018)..... | 75 |
| Quadro 3.12 – Caracterização físico-química dos <i>bulking agents</i> utilizados nas pesquisas de biossecagem..... | 76 |
| Quadro 3.13 – Características da matéria orgânica dissolvida e dos elementos dos <i>bulking agents</i> utilizados na pesquisa realizada por Hao, Yang e Jahng (2018) | 79 |
| Quadro 3.14 – Caracterização físico-química da matriz inicial utilizada nas pesquisas de biossecagem..... | 80 |
| Quadro 3.15 – Informações dos procedimentos operacionais da biossecagem do lodo de ETE..... | 85 |
| Quadro 4.1 – Proporção mássica da matriz inicial, taxa de aeração, umidade da matriz inicial, revolvimento e duração para cada ensaio de biossecagem realizado | 99 |
| Quadro 4.2 – Parâmetros analisados para a caracterização do lodo, da serragem e da ração..... | 101 |
| Quadro 4.3 – Parâmetros físico-químicos analisados para a caracterização da matriz de cada ensaio ao longo do processo de biossecagem | 102 |
| Quadro 5.1 – Caracterização físico-química do lodo utilizado nos ensaios 1, 2, 7 e 8 de biossecagem e a faixa de valores presentes na literatura | 106 |
| Quadro 5.2 – Caracterização físico-química da serragem utilizada nos ensaios de biossecagem e as faixas de valores presentes na literatura..... | 107 |

| | |
|--|-----|
| Quadro 5.3 – Caracterização físico-química da matriz inicial dos ensaios de biossecagem e a faixa de valores presentes na literatura | 108 |
| Quadro 5.4 – Caracterização temporal do monitoramento da temperatura ao longo dos ensaios | 109 |
| Quadro 5.5 – Temperatura máxima, mínima e média dos ensaios de biossecagem | 110 |
| Quadro 5.6 – Períodos nos quais a temperatura das matrizes dos Ensaios 4, 5, 6, 7 e 8 foram superiores ou iguais a 50°C..... | 114 |
| Quadro 5.7 – Realização de revolvimento da matriz durante os ensaios de biossecagem | 115 |
| Quadro 5.8 – Umidade, em %, da matriz durante os ensaios de biossecagem..... | 116 |
| Quadro 5.9 – Sólidos Voláteis, em %, da matriz durante os ensaios de biossecagem ... | 118 |
| Quadro 5.10 – pH da matriz durante os ensaios de biossecagem | 119 |
| Quadro 5.11 – Densidade, em g.cm ⁻³ , da matriz durante os ensaios de biossecagem ... | 120 |
| Quadro 5.12 – FAS, em %, da matriz durante os ensaios de biossecagem | 121 |
| Quadro 5.13 – Balanço de massa durante a biossecagem do Ensaio 1 | 124 |
| Quadro 5.14 – Balanço de massa durante a biossecagem do Ensaio 2 | 125 |
| Quadro 5.15 – Balanço de massa durante a biossecagem do Ensaio 3 | 126 |
| Quadro 5.16 – Balanço de massa durante a biossecagem do Ensaio 4 | 127 |
| Quadro 5.17 – Balanço de massa durante a biossecagem do Ensaio 5 | 128 |
| Quadro 5.18 – Balanço de massa durante a biossecagem do Ensaio 6 | 128 |
| Quadro 5.19 – Balanço de massa durante a biossecagem do Ensaio 7 | 129 |
| Quadro 5.20 – Balanço de massa durante a biossecagem do Ensaio 8 | 130 |
| Quadro 5.21 – Valores globais da água gerada pelo metabolismo microbiano, da energia gerada pelas reações biológicas, do calor sensível consumido pela água e do calor sensível consumido pelos sólidos secos dos ensaios de biossecagem | 131 |
| Quadro 5.22 – Valores da energia gerada pelas reações biológicas, do calor sensível consumido pela água e do calor sensível consumido pelos sólidos secos das pesquisas de biossecagem..... | 132 |
| Quadro 5.23 – Índice de Biossecagem dos Ensaios 1 e 2..... | 132 |
| Quadro 5.24 – Índice de Biossecagem dos Ensaios 3 | 133 |
| Quadro 5.25 – Índice de Biossecagem dos Ensaios 4 | 133 |
| Quadro 5.26 – Índice de Biossecagem dos Ensaios 5 e 6..... | 133 |
| Quadro 5.27 – Índice de Biossecagem dos Ensaios 7 e 8..... | 133 |

| | |
|---|-----|
| Quadro 5.28 – Valores de PCI e PCS (base úmida e seca), em kcal.kg ⁻¹ , e da incerteza para o lodo da campanha 2, a matriz D20 do Ensaio 7, a matriz D0 do Ensaio 8 (sem adição de água destilada) e a matriz D20 do Ensaio 8..... | 141 |
| Quadro 5.29 – Valores de PCI e PCS, em kJ.kg ⁻¹ , das amostras analisadas nas pesquisas e neste trabalho | 142 |
| Quadro 5.30 – Valores de PCS e PCI na base úmida, em kJ.kg ⁻¹ , de alguns materiais comumente utilizados em estações de incineração para geração de energia..... | 143 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|---------|---|
| ABNT: | Associação Brasileira de Normas Técnicas do Brasil |
| BI: | <i>Biodrying Index</i> - Índice de biossecagem |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| DECiv: | Departamento de Engenharia Civil |
| ETE: | Estação de Tratamento de Esgotos |
| FAS: | <i>Free Air Space</i> – porcentagem de poros ocupados apenas pelo de ar |
| I: | Incerteza |
| PCI: | Poder Calorífico Inferior |
| PCS: | Poder Calorífico Superior |
| PNRS: | Política Nacional de Resíduos Sólidos |
| UASB: | <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> |
| UFSCar: | Universidade Federal de São Carlos |
| WRRF: | <i>Water resource recovery facility</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--|---|
| A: | Superfície da parede do reator |
| Água a ser adicionada: | quantidade de água destilada a ser adicionada na matriz |
| ASH: | cinza ou matéria mineral |
| A_{top} : | área da superfície de radiação do corpo |
| b.s.: | base seca |
| b.u.: | base úmida |
| BD: | densidade da matriz |
| C/N: | relação carbono e nitrogênio |
| C: | carbono |
| $C_{\text{água vap}}$: | calor específico do vapor d'água |
| $C_{\text{água}}$: | calor específico da água |
| $C_{\text{ar seco}}$: | calor específico do ar seco |
| CE: | condutividade elétrica |
| CEL: | celulose |
| COT: | carbono orgânico total |
| $C_{\text{sólido}}$: | calor específico dos sólidos secos |
| CT: | carbono total |
| d_{H_2O} : | densidade da água |
| d_{inor} : | densidade da fração inorgânica |
| COD: | carbono orgânico dissolvido |
| d_{sv} : | densidade da fração volátil |
| F_a : | fator de configuração para levar em conta para a posição relativa e geometria dos objetos |
| F_{da} : | massa da vazão de ar seco |
| F_e : | fator de emissividade para levar em conta para corpos de radiação não negros |
| H: | hidrogênio |
| H_c : | calor de combustão dos sólidos voláteis biodegradáveis |
| HEM: | hemicelulose |
| LIG: | lignina |
| $L_{\text{lat água}}$ ou λ_{evap} : | calor latente da água |
| M_{lodo} : | massa do lodo |
| M_{matriz} : | massa da amostra da matriz |

| | |
|---------------------------------------|--|
| $M_{\text{ração}}$: | massa da ração |
| M_{serragem} : | massa da serragem |
| M_{total} : | massa total da matriz |
| $M_{\text{água, evap}}$: | massa de água removida pela evaporação |
| $M_{\text{água, f}}$: | massa final de água na matriz |
| $M_{\text{água, i}}$: | massa inicial de água na matriz |
| $M_{\text{água, metab}}$: | massa de água gerada pelo metabolismo microbiano |
| $M_{\text{água, revolv}}$: | massa de água removida pelo revolvimento |
| $M_{\text{água}}$: | massa de água no material |
| M_{ar} : | massa de ar seco |
| M_{eva} : | Massa de água evaporada |
| $m_{\text{H}_2\text{O}}$: | quantidade de água removida |
| $MM_{\text{água}}$: | massa molecular da água |
| MM_{ar} : | massa molecular do ar |
| m_{SF} : | massa relativa aos sólidos fixos da matriz |
| $M_{\text{sólido}}$: | massa de sólidos secos no material |
| $M_{\text{ST matriz}}$: | massa de sólidos seco na matriz |
| m_{ST} : | massa relativa aos sólidos totais da matriz |
| $m_{\text{sv consumido}}$: | quantidade de sólidos voláteis consumido |
| m_{SV} : | massa relativa aos sólidos voláteis da matriz |
| m_{U} : | massa relativa à umidade da matriz |
| N : | nitrogênio |
| NT : | nitrogênio total |
| NTK : | nitrogênio total Kjeldahl |
| O : | oxigênio |
| P_{abs} : | pressão absoluta do gás |
| pH : | potencial hidrogeniônico |
| $P_{\text{v, água}}$: | pressão de vapor d'água no ar em uma temperatura específica |
| $P_{\text{vs, água}}$: | pressão de saturação de vapor d'água |
| $Q_{\text{água vap}}$: | calor sensível consumido pelo vapor d'água |
| $Q_{\text{água}}$: | calor sensível consumido pela água |
| $Q_{\text{ar rot}}$: | vazão de aeração no rotâmetro |
| $Q_{\text{ar seco}}$: | calor sensível consumido pelo ar seco |
| Q_{ar} : | vazão de entrada de ar |
| Q_{bio} ou Q_{sv} : | energia gerada pelas reações biológicas, isto é, calor gerado pela |

degradação dos SV

| | |
|--------------------------------------|---|
| Q_{condu} : | calor dissipado por condução |
| $Q_{\text{consumida}}$: | energia consumida no processo |
| $Q_{\text{dissipada}}$: | energia dissipada no processo |
| Q_{evap} : | calor latente da água evaporada |
| Q_{evapo} : | calor latente consumido pela água evaporada |
| Q_{radi} : | calor dissipado por radiação |
| Q_{revolv} : | calor dissipado pelo revolvimento |
| $Q_{\text{sólido}}$: | calor sensível consumido pelos sólidos secos |
| S: | enxofre |
| SF: | sólidos fixos |
| SOL: | fração solúvel |
| ST_{matriz} : | sólidos totais da matriz |
| ST: | sólidos totais |
| SV: | sólidos voláteis |
| SVB: | sólidos voláteis biodegradáveis |
| $SV_{\text{consumido}}$: | sólidos voláteis consumidos |
| T: | temperatura média da matriz |
| TA: | taxa de aeração |
| T_a : | temperatura ambiente |
| $T_{\text{ar,entrada}}$: | temperatura da umidade do ar de entrada |
| $T_{\text{ar,saída}}$: | temperatura da umidade do ar de saída |
| T_m : | temperatura da matriz |
| T_t : | temperatura da superfície do topo da matriz |
| U_{desejada} : | umidade da matriz inicial desejada |
| U_{lodo} : | umidade do lodo |
| $U_{\text{ração}}$: | umidade da ração |
| U_{serragem} : | umidade da serragem |
| $U_{\text{teórica matriz}}$: | umidade calculada da matriz inicial sem adição de água |
| U: | umidade |
| U_{calor} : | coeficiente da transmissão de calor da parede |
| UR: | umidade relativa |
| $W_{100^\circ\text{C}}$: | Fração solúvel em água quente |
| Y_f : | umidade absoluta do ar de saída |
| $Y_{\text{H}_2\text{O}/\text{SV}}$: | coeficiente de geração de água pelo metabolismo microbiano ao |

consumir sólidos voláteis

Y_i : umidade absoluta do ar de entrada

ΔSV : consumo de SV

ΔT_m : variação da temperatura da matriz

σ : constante de Stefan-Boltzmann

ω : peso do vapor d'água na base de ar seco

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 31 |
| 2. OBJETIVO..... | 35 |
| 2.1. OBJETIVO GERAL..... | 35 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 35 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 37 |
| 3.1. LODO DE ETE..... | 37 |
| 3.1.1. Características do Lodo de ETE..... | 38 |
| 3.1.2. Sistemas de tratamento de lodo de ETE..... | 40 |
| 3.2. BIOSSECAGEM..... | 44 |
| 3.2.1. Formas de avaliação do processo de biossecagem do lodo de ETE..... | 45 |
| 3.2.1.1. Estágios da biossecagem de acordo com a temperatura da matriz..... | 46 |
| 3.2.1.2. Estágios da biossecagem de acordo com o principal fator de secagem..... | 49 |
| 3.2.1.3. Estágios da biossecagem de acordo com a operação..... | 50 |
| 3.2.1.4. Índice de Biossecagem..... | 51 |
| 3.2.1.5. Características do produto..... | 52 |
| 3.2.2. Processos da Biossecagem do lodo de ETE..... | 57 |
| 3.2.2.1. Processo Biológico..... | 57 |
| 3.2.2.1.1. Quantidade e distribuição de oxigênio..... | 58 |
| 3.2.2.1.2. Umidade..... | 60 |
| 3.2.2.1.3. Disponibilidade de Nutrientes..... | 61 |
| 3.2.2.2. Processo Físico..... | 63 |
| 3.2.2.2.1. Remoção de água – Balanço de massa de água..... | 63 |
| 3.2.2.2.2. Troca de Calor – Balanço de energia..... | 65 |
| 3.2.3. Desenvolvimento e operação da Biossecagem do lodo de ETE..... | 70 |
| 3.2.3.1. Preparação da Matriz Inicial..... | 70 |
| 3.2.3.2. Procedimentos operacionais..... | 84 |
| 3.3. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA..... | 88 |

| | |
|--|-----|
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 91 |
| 4.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 91 |
| 4.2. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA MATRIZ INICIAL DOS ENSAIOS DE BIOSSECAGEM | 92 |
| 4.3. EQUIPAMENTO LABORATORIAL DO SISTEMA DE BIOSSECAGEM..... | 95 |
| 4.4. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS DE BIOSSECAGEM..... | 98 |
| 4.5. BALANÇO DE MASSA | 102 |
| 4.6. REMOÇÃO DE UMIDADE E TROCA DE CALOR..... | 103 |
| 4.7. PODER CALORÍFICO | 103 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 105 |
| 5.1. SISTEMATIZAÇÃO DAS PESQUISAS DE BIOSSECAGEM DO LODO DE ETE DESCRITOS NA LITERATURA..... | 105 |
| 5.2. PREPARAÇÃO DA MATRIZ INICIAL DOS ENSAIOS DE BIOSSECAGEM | 106 |
| 5.2.1. Lodo de ETE | 106 |
| 5.2.2. <i>Bulking agents</i> | 106 |
| 5.2.3. Matriz Inicial | 107 |
| 5.3. DESENVOLVIMENTO DA BIOSSECAGEM NOS ENSAIOS | 108 |
| 5.3.1. Temperatura da matriz | 108 |
| 5.3.2. Revolvimento..... | 114 |
| 5.3.3. Umidade da matriz | 116 |
| 5.3.4. Sólidos Voláteis da matriz | 118 |
| 5.3.5. pH da matriz | 119 |
| 5.3.6. Densidade e FAS da matriz..... | 120 |
| 5.3.7. Balanço de Massa..... | 123 |
| 5.3.8. Remoção de Umidade e Troca de Calor | 131 |
| 5.3.9. Índice de Biossecagem | 132 |
| 5.4. ANÁLISE GLOBAL DA BIOSSECAGEM NOS ENSAIOS | 133 |
| 5.4.1. Taxa de aeração | 134 |
| 5.4.2. Proporção mássica..... | 136 |

| | |
|---|-----|
| 5.4.3. Umidade inicial da matriz | 139 |
| 5.4.4. Poder calorífico | 140 |
| 6. CONCLUSÃO | 145 |
| 7. SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES | 147 |
| REFERÊNCIAS | 149 |
| APÊNDICE A – Gráficos da massa de água e de sólidos dos ensaios de biossecagem | 155 |
| APÊNDICE B – Temperatura Registrada ao longo dos 8 (oito) ensaios de biossecagem | 161 |
| APÊNDICE C – Fotos da matriz inicial e final dos ensaios de biossecagem..... | 163 |

1. INTRODUÇÃO

A escassez de recursos naturais é um problema mundial que impõe a necessidade de mudança de paradigmas das soluções lineares para soluções integradas e que busquem a sustentabilidade. Dentre os recursos naturais em escassez, destacam-se o fósforo, o gás natural, utilizado no processo de fixação industrial do nitrogênio, e a água em quantidade e qualidade adequada para as diversas atividades antrópicas. Os depósitos mundiais de rochas fosfáticas são suficientes para os próximos 100 a 1000 anos, dependendo da eficiência de extração e do uso de fertilizantes (VERSTRAETE; VAN DE CAVEYE; DIAMANTIS, 2009). A produção de fertilizantes com base no nitrogênio tem como principal matéria prima a amônia, na qual sua produção é dependente de gás natural, um combustível não renovável (FIXEN; JOHNSTON, 2012). A escassez de água tem se tornado mais frequente, sendo decorrente de fatores ambientais como, por exemplo, regiões áridas e de fatores antrópicos, como aumento da população e do padrão de vida, mudanças climáticas, industrialização, agricultura e urbanização (VERSTRAETE; VAN DE CAVEYE; DIAMANTIS, 2009).

A escassez de recursos é um fator limitante para o desenvolvimento econômico e social. Deste modo, a mudança de paradigma é fundamental para a obtenção desses recursos com base em outras fontes, aplicando assim o conceito de economia circular que prioriza criação de valor enquanto preserva os recursos naturais e diminui o uso de recursos finitos (INSTITUT MONTAIGNE, 2016).

As Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) têm como objetivo tratar os efluentes sanitários, visando assim a saúde pública da população e a conservação do meio ambiente, garantindo o padrão de lançamento de esgotos tratados no corpo receptor definido pela resolução CONAMA 430/2011 (BRASIL, 2011) e da classe de enquadramento desse curso d'água definida pela resolução CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005).

Contudo, as ETEs também podem ter como objetivo a recuperação de recursos como água, nutrientes (como fósforo e nitrogênio) e energia, sendo denominadas ETEs Sustentáveis ou *Water Resource Recovery Facility* (WRRF). Segundo van der Hoeck, de Fooij e Struiker (2016), outros recursos, como fibra celulósica, biopolímeros, bioplásticos e proteína, também podem ser recuperados nas ETEs.

De uma forma geral, os esgotos tratados podem ser utilizados para usos potáveis ou não potáveis, o lodo gerado na ETE pode ser aplicado na agricultura como fonte de nutrientes ou para geração de energia e os gases gerados nas unidades da ETE também

podem ser utilizados para a geração de energia. Assim, ocorre o uso eficiente dos recursos, o prolongamento do ciclo de vida de diversas substâncias por meio da reciclagem e reuso e a disposição ambientalmente adequada apenas dos rejeitos, conforme preconiza a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010).

Quanto aos lodos gerados em ETEs, Achon e Cordeiro (2016) analisaram as formas de destinação e disposição final do lodo desaguado de 32 ETEs do estado de São Paulo. Observou-se que nenhuma ETE reusa ou reutiliza lodo desaguado, 69% dispõem em aterro, 28% nunca removeu o lodo e 3% não informou a destinação ou disposição. Por meio desse estudo, nota-se que o lodo atualmente muitas vezes não é visto como fonte de nutrientes ou energia. Tal fato pode ser explicado pela disposição do lodo em aterros ser visto como solução única e comum pela maioria dos gestores, aliado ao custo da caracterização e monitoramento do lodo para uso como biossólido na agricultura definidos pela resolução CONAMA 375/2006 (BRASIL, 2006), que define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto (BITTENCOURT; SERRAT; AISSE, 2017), que foi revogada recentemente pela resolução CONAMA 498 de 19 de agosto de 2020, que define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências (BRASIL, 2020).

Devido à essas questões que dificultam o uso agrícola do lodo de esgoto, o aproveitamento energético do lodo ganha notoriedade por ser uma medida que exige um padrão menor de qualidade, além de buscar a sustentabilidade, ser dotada dos princípios da economia circular e estar em consonância com a PNRS.

A biossecagem (*biodrying*) é um dos tipos de tratamento do lodo que tem como objetivo seu aproveitamento energético, transformando-o em um biocombustível por meio do calor metabólico microbiano, gerado durante a degradação aeróbia da matéria orgânica, e da aeração forçada. Assim, no processo da biossecagem, a matéria orgânica é parcialmente estabilizada permitindo o uso como biocombustível, diferenciando-o do processo de compostagem no qual ocorre a máxima conversão da matéria orgânica do resíduo pelos microrganismos para posteriormente ser utilizado na agricultura.

Para a biossecagem do lodo de esgoto é necessário iniciar o processo com uma matriz composta de lodo e *bulking agents* (como, por exemplo, serragem, palha, casca de arroz), que tem como função estruturar a matriz, ser fonte de nutrientes e corrigir a umidade da matriz inicial.

As publicações sobre a biossecagem do lodo de esgoto são recentes, sendo iniciadas em 1996 e apresentando uma tendência de crescimento do número de

publicações ao longo dos anos. Tal fato ocorre devido ao potencial dessa tecnologia em aproveitar diferentes tipos de lodo de esgoto, conforme apresentado no Quadro 3.9, para a geração de energia e, assim, destiná-lo de forma ambientalmente adequada.

Para a realização dessa pesquisa, utilizou-se lodo anaeróbio proveniente de uma ETE que atualmente o destina para um aterro, sem aproveitar seu potencial energético ou recuperar recursos como nutrientes. Ademais, é importante destacar que a maioria das ETEs trata o lodo como um rejeito, destinando-o para aterros.

Assim, a implantação da biossecagem do lodo de esgoto possibilita uma destinação ambientalmente adequada, a geração de energia a ser utilizada na própria estação, diminuindo os custos e/ou a venda do produto para a geração de energia em outros empreendimentos.

2. OBJETIVO

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo desta pesquisa é avaliar o processo de biossecagem do lodo anaeróbio, analisando os processos e as operações envolvidas.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos dessa pesquisa são:

- Compilar e sistematizar as pesquisas e resultados dos ensaios de biossecagem descritos na literatura;
- Avaliar a influência da taxa de aeração no processo de biossecagem;
- Avaliar a influência da incorporação de *bulking agents* e sua proporção mássica na matriz inicial;
- Avaliar a influência da umidade da matriz inicial no processo de biossecagem.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. LODO DE ETE

O lodo de esgoto é originado no tratamento de esgotos domiciliares e/ou industriais, sendo predominantemente orgânico, mas contendo teores variáveis de componente inorgânicos (CARVALHO et al., 2015). Apesar do lodo de esgoto conter grandes quantidades de água, aproximadamente 98% da sua composição, é considerado um resíduo sólido ou semissólido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e pela norma NBR 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas do Brasil (ABNT).

A PNRS (BRASIL, 2010) dispõe sobre a gestão integrada e o gerenciamento dos resíduos sólidos em âmbito nacional, apresentando seus princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes. Além disso, em seu artigo 3º apresenta diversas definições, dentre elas:

[...] XV - **rejeitos**: resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada;

XVI - **resíduos sólidos**: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível; [...] (BRASIL, 2010, grifo do autor).

Complementar à essa definição, a ABNT, em sua norma NBR 10.004, apresenta a classificação dos resíduos sólidos, definindo:

Resíduos sólidos: resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. (ABNT, 2010, grifo do autor).

Assim, todos os resíduos sólidos gerados nas ETEs – materiais retidos nos sistemas de gradeamento, no peneiramento e na caixa de areia e lodos gerados no tratamento primário e secundário – devem ter destinação ambientalmente adequada

segundo a ordem de prioridade de gestão e gerenciamento definida pela PNRS, conforme é apresentado em seu artigo 9º (ACHON; KELLNER; AKUTSU, 2017):

“Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.” (BRASIL, 2010).

3.1.1. Características do Lodo de ETE

O lodo de esgoto apresenta variações qualitativas e quantitativas que dependem das características do esgoto tratado, da tecnologia de tratamento, da etapa no qual o lodo foi gerado e do tipo de manejo e de tratamento do lodo – adensamento, estabilização, condicionamento, desaguamento e higienização (ACHON; KELLNER; AKUTSU, 2017; ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

O lodo de ETE pode ser gerado em diferentes unidades das ETEs, sendo classificado, de acordo com sua origem, em lodo primário, lodo biológico aeróbio (não estabilizado e estabilizado), lodo biológico anaeróbio e lodo químico, conforme apresentado no Quadro 3.1. Além disso, os diferentes tipos de lodos podem ser enviados para tratamento conjuntamente, sendo denominado lodo misto (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

Quadro 3.1 – Tipo de lodo e sua origem nas ETEs

| Tipo de lodo | Origem |
|---|--|
| Lodo primário | Tanque séptico; Decantador primário. |
| Lodo biológico aeróbio (não estabilizado) | Lodos ativados convencional; Reatores anaeróbios com biofilmes – alta carga (filtro biológico de alta carga, biofiltros aerados e submersos e biodiscos). |
| Lodo biológico aeróbio (estabilizado) | Lodos ativados – aeração prolongada; Reatores aeróbios com biofilmes – baixa carga (filtro biológico de baixa carga, biodisco, biofiltro aerado). |
| Lodo biológico anaeróbio (estabilizado) | Lagoas de estabilização (lagoas facultativas, lagoas anaeróbias-facultativas, lagoas aeradas facultativas, lagoas aeradas de mistura completa – lagoas de decantação); Reatores anaeróbios (reatores UASB, filtros anaeróbios). |
| Lodo químico | Decantador primário com precipitação química; Lodos ativados com precipitação química de fósforo. |

Fonte: adaptado de Andreoli, von Sperling e Fernandes (2001).

O lodo gerado no tratamento de esgoto sanitário é composto basicamente por 2% de matéria orgânica e 98% de água (DAMASCENO E CAMPOS¹, 1998 apud REIS, 2017). Como já mencionado, a composição do lodo e suas características variam de acordo com o tipo de lodo, conforme é possível observar no Quadro 3.2 que apresenta a composição físico-química do lodo primário e secundário (anaeróbio e aeróbio).

¹ DAMASCENO, S., CAMPOS, J. R. *Caracterização de lodo de estação de tratamento de esgotos sanitários para uso agrícola*. 1998.

Segundo Andreoli, von Sperling e Fernandes (2001), de uma forma geral os principais contaminantes do lodo são metais pesados (cádmio, chumbo, mercúrio, níquel, zinco, cobre, cromo, arsênio, selênio, dentre outros), poluentes orgânicos variados (solventes orgânicos, bifenilos policlorados e pesticidas) e microrganismos patogênicos (ovos de helmintos, cistos de protozoários, bactérias e vírus).

Quadro 3.2 – Composição físico-química do lodo de esgotos de acordo com o tipo de tratamento do esgoto (anaeróbio e aeróbio)

| Característica | Lodo Primário ¹ (tanque séptico) | Lodo Secundário | |
|--|--|---------------------------|--|
| | | Lodo ativado ² | Lodo anaeróbio estabilizado ³ |
| Sólidos Totais | 221 g.kg ⁻¹ | 0,880 g.kg ⁻¹ | 101 g.kg ⁻¹ |
| Sólidos Voláteis | 280 g.kg ⁻¹ | 0,777 g.kg ⁻¹ | 682 g.kg ⁻¹ |
| Nitrogênio | 21 g.kg ⁻¹ | 0,047 g.kg ⁻¹ | 60,8 g.kg ⁻¹ |
| Fósforo (P ₂ O ₅) | - | 4,13 g.l ⁻¹ | 21 g.kg ⁻¹ |
| Carbono Orgânico (COT) | 155 g.kg ⁻¹ | 0,165 g.kg ⁻¹ | 325 g.kg ⁻¹ |
| pH | 7,00 | 6,17 | - |

Fonte: ¹da Silva et al. (2008); ²Magalhães (2008); ³Adani e Tambone (2005) adaptado por Correia (2009).

Quadro 3.3 – Caracterização físico-química do lodo de esgoto de diferentes ETEs

| Parâmetro | Unidade | Barueri | Franca | Curitiba | Jundiaí | Barcelona ¹ |
|------------------|---------------------|---------|--------|----------|---------|------------------------|
| Umidade | % | 71,2 | 82,7 | - | 76,2 | - |
| Sólidos Voláteis | % | 56,8 | 72,5 | - | 69,0 | 85,2 |
| pH | - | 6,4 | 5,4 | 5,9 | 5,5 | 6,1 |
| Carbono Orgânico | g kg ⁻¹ | 293 | 382 | 321 | 226 | - |
| Nitrogênio Total | g kg ⁻¹ | 42,1 | 68,2 | 49,1 | 21,2 | 42,0 |
| Fósforo | g kg ⁻¹ | 26,9 | 12,9 | 3,7 | 4,5 | 7,2 |
| Potássio | g kg ⁻¹ | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 0,66 | 1,2 |
| Cálcio | g kg ⁻¹ | 47,8 | 24,8 | 15,9 | 6,6 | 14,0 |
| Enxofre | g kg ⁻¹ | 17,1 | 15,7 | - | 11,1 | - |
| Sódio | g kg ⁻¹ | 0,5 | 0,9 | - | 2,4 | - |
| Magnésio | g kg ⁻¹ | 4,5 | 2,2 | 6,0 | 1,3 | 2,2 |
| Arsênio | mg kg ⁻¹ | < 1 | < 1 | - | - | - |
| Alumínio | mg kg ⁻¹ | 23.283 | 23.317 | - | 11.465 | - |
| Cádmio | mg kg ⁻¹ | 9,4 | 2,0 | 3,0 | - | 0,6 |
| Chumbo | mg kg ⁻¹ | 348,9 | 140,5 | 123 | 136,4 | 34 |
| Cobre | mg kg ⁻¹ | 953,0 | 240,9 | 325 | 547 | 167 |
| Cromo | mg kg ⁻¹ | 1297,2 | 1230,3 | 140 | 97,5 | 28 |
| Mercúrio | mg kg ⁻¹ | < 0,01 | < 0,01 | 1,0 | - | 1,4 |
| Molibdênio | mg kg ⁻¹ | < 0,01 | < 0,01 | - | - | - |
| Níquel | mg kg ⁻¹ | 605,8 | 72,4 | 73 | 25,3 | 14 |
| Selênio | mg kg ⁻¹ | < 0,01 | < 1 | - | - | - |
| Zinco | mg kg ⁻¹ | 3372 | 1198 | 728 | 839 | 459 |
| Boro | mg kg ⁻¹ | 29,3 | 19,7 | - | 10,1 | - |
| Manganês | mg kg ⁻¹ | 418,9 | 232,5 | - | 425 | - |
| Ferro | mg kg ⁻¹ | 37.990 | 24.176 | - | 15.728 | 5.750 |

Nota: ¹ Reis (2017) utilizou nessa pesquisa lodo desaguado em centrífuga, proveniente de tratamento anaeróbio/anóxico/aeróbio. ² Bertiol e Camargo (2006) não especificaram em seu texto a origem do lodo e/ou a tecnologia da ETE no qual o lodo foi coletado.

Fonte: Adaptado de Bertiol e Camargo (2006); Reis (2017).

No Quadro 3.3 é apresentada a caracterização físico-química do lodo de esgoto gerado em diferentes ETEs. Observa-se que as maiores diferenças ocorrem em relação à quantidade de metais presentes no lodo, tal fato pode ser explicado pela origem e

composição do esgoto tratado, pois algumas ETEs podem receber quantidades de esgoto industrial, os quais podem possuir metais em sua composição.

3.1.2. Sistemas de tratamento de lodo de ETE

O sistema de tratamento de lodo de ETE tem como objetivo estabilizar e reduzir seu volume por meio de técnicas físicas, químicas e biológicas, permitindo assim a viabilidade e a factibilidade do seu reuso ou reciclagem. Segundo Andreoli, von Sperling e Fernandes (2001), o gerenciamento do lodo pode ser classificado em seis etapas de acordo com seus objetivos:

- **Adensamento:** remoção de umidade (redução de volume);
- **Estabilização:** remoção de matéria orgânica (redução de sólidos voláteis);
- **Condicionamento:** preparação para desaguamento (principalmente mecânica);
- **Desaguamento:** remoção de umidade (redução do volume);
- **Higienização:** remoção de organismos patogênicos;
- **Disposição final:** destinação final dos subprodutos.

Existem diversos processos que podem ser utilizados em cada etapa do gerenciamento do lodo, conforme apresentado na Figura 3.1, sendo que alguns desses processos estão presentes em mais de uma etapa de gerenciamento.

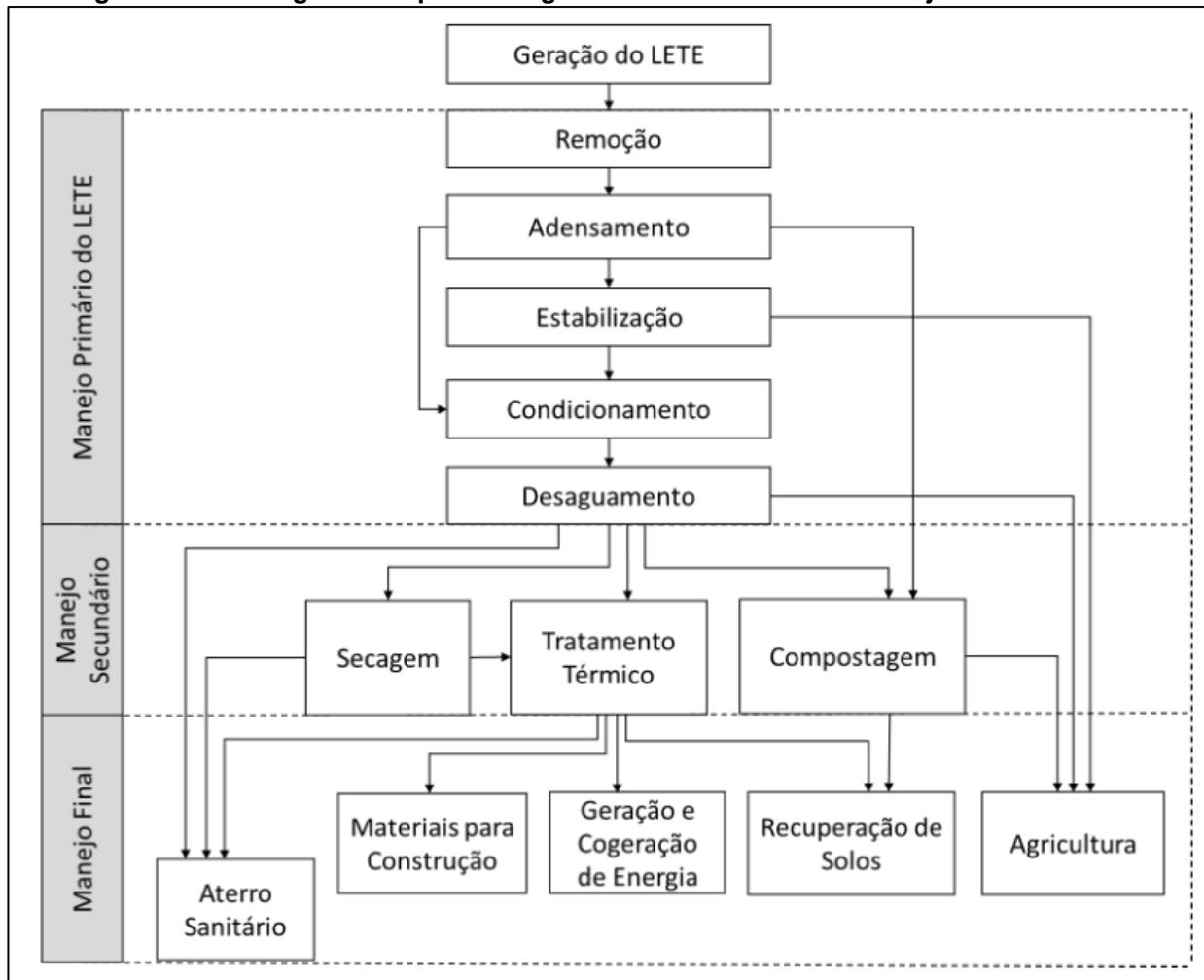
Figura 3.1 – Etapas do gerenciamento do lodo e principais processos utilizados

| Adensamento | Estabilização | Condicionamento |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Adensamento por gravidade • Flotação • Centrífuga • Filtro prensa de esteiras | <ul style="list-style-type: none"> • Digestão anaeróbia • Digestão aeróbia • Tratamento térmico • Estabilização química | <ul style="list-style-type: none"> • Condicionamento químico • Condicionamento térmico |
| Desaguamento | Higienização | Disposição final |
| <ul style="list-style-type: none"> • Leitões de secagem • Lagoas de lodo • Filtro prensa • Centrífuga • Filtro prensa de esteiras • Filtro a vácuo • Secagem térmica | <ul style="list-style-type: none"> • Adição de cal (caleação) • Tratamento térmico • Compostagem • Oxidação úmida • Outros (radiação gama, solarização, etc) | <ul style="list-style-type: none"> • Reciclagem agrícola • Recuperação de áreas degradadas • Landfarming (disposição no solo) • Uso não agrícola (fabricação lajotas, combustível, etc) • Incineração • Oxidação úmica • Aterro sanitário |

Fonte: adaptado de Andreoli, von Sperling e Fernandes (2001).

É importante ressaltar que o gerenciamento do lodo em uma ETE não possui necessariamente todas as etapas apresentadas na Figura 3.1. Segundo da Silva (2019), o manejo do lodo de ETE pode ser dividido em manejo primário, secundário e final, sendo que o manejo primário corresponde à quatro etapas de gerenciamento apresentadas por Andreoli, von Sperling e Fernandes (2001) – adensamento, estabilização, condicionamento e desaguamento –, o manejo secundário à etapa de higienização e o manejo final à etapa de destinação final. Assim, o autor apresenta um fluxograma (Figura 3.2) do processo genérico de tratamento e manejo do lodo de ETE, sendo possível identificar as diversas possibilidades de gerenciamento do lodo que uma ETE pode adotar.

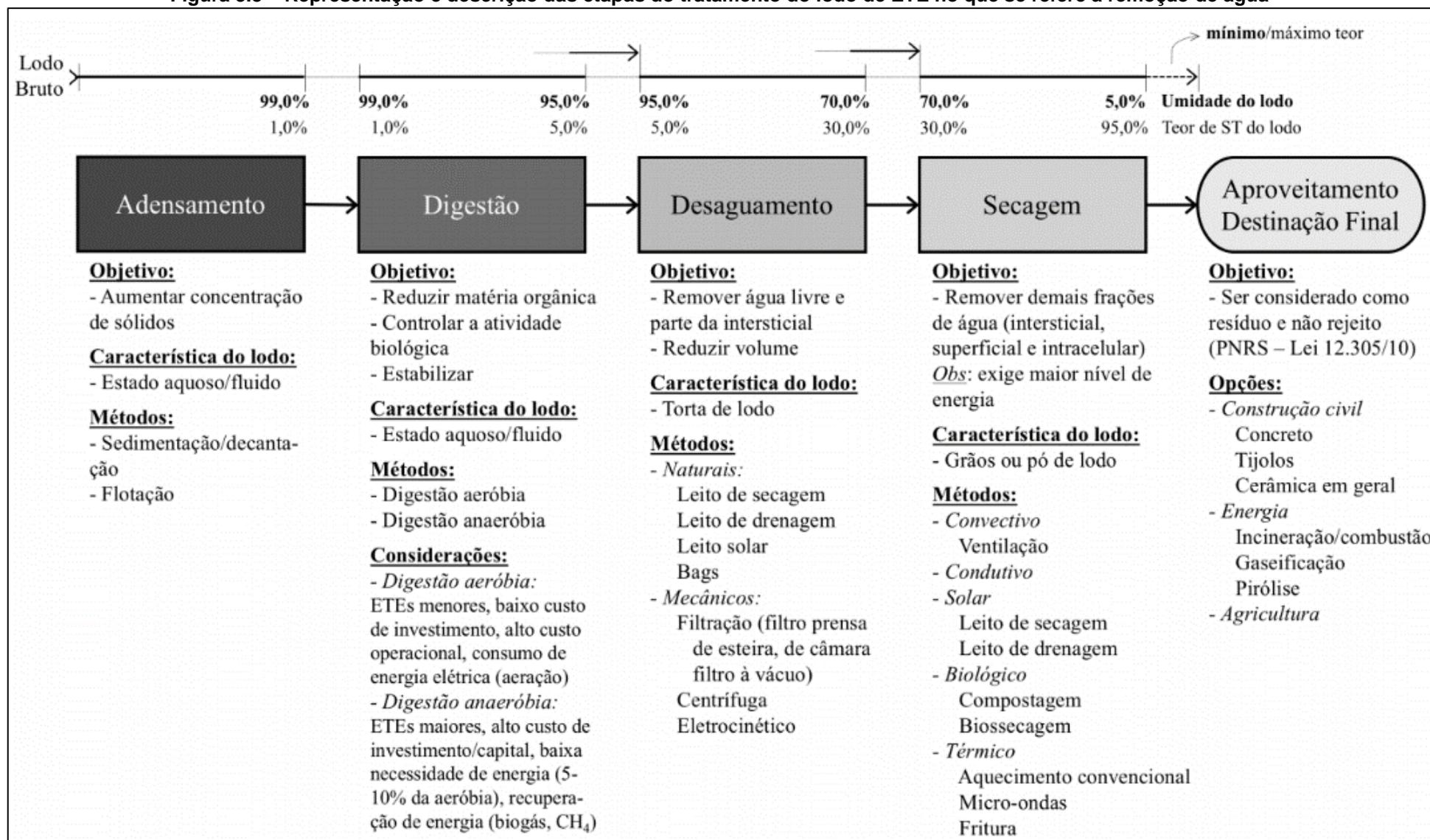
Figura 3.2 – Fluxograma do processo genérico de tratamento e manejo do lodo de ETE



Nota: LETE: Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto.
Fonte: da Silva (2019).

Para a destinação adequada do lodo de ETE, é necessário que ocorra a remoção de umidade do lodo que, segundo Reis (2017), pode ocorrer nas etapas de adensamento, digestão, desaguamento e secagem, conforme apresentado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Representação e descrição das etapas do tratamento do lodo de ETE no que se refere à remoção de água



Fonte: Reis (2017).

Segundo Achon, Kellner e Akutsu (2017), o lodo gerado predominantemente de processos biológicos de tratamento de esgoto apresenta cerca de 95% de umidade, isto é, apenas 5% de sólidos totais. O desaguamento desse lodo pode ocorrer por meio de 1) sistemas naturais abertos ou não confinados (leitos de secagem, leitos de drenagem, lagoas de lodo, dentre outros), sendo que o teor de sólidos pode atingir valores superiores ao intervalo de 20 a 25%, ou; 2) sistemas mecânicos (filtros prensa, centrífugas, prensa desaguadora, dentre outros), sendo que o teor de sólidos atinge no máximo 20 a 25%.

Posteriormente, o lodo desaguado pode ser encaminhado para um processo de secagem térmica, que consiste na evaporação da água utilizando energia térmica natural ou mecânica. Os resultados da secagem térmica são: redução significativa do volume do lodo, o teor de sólidos pode chegar a 95% e há a possibilidade de higienização do lodo. Exemplos de processos de secagem térmica são a compostagem e o biossecagem do lodo de ETE (ACHON; KELLNER; AKUTSU, 2017).

3.2. BIOSSECAGEM

Biossecagem (*biodrying* ou *bio-drying*) é um processo que visa remover a umidade dos resíduos utilizando o calor metabólico microbiano, gerado durante a degradação aeróbia da matéria orgânica, e a aeração forçada, no qual a matéria orgânica é parcialmente estabilizada, preservando assim o poder calorífico dos resíduos e permitindo sua utilização como biocombustível (VELIS et al., 2009; ZHAO et al., 2011a; WINKLER et al., 2013; HUILIÑIR; VILLEGAS, 2015; TOM; PAWELS; HARIDAS, 2016; MA; ZHANG; LI, 2016; YUAN et al., 2017; WU et al., 2018; PSALTIS; KOMILIS, 2019) e/ou como fertilizante (REIS et al., 2019). Além disso, a biossecagem beneficia as etapas de armazenamento e transporte, devido à redução volumétrica que ocorre durante o processo (ZHAO et al., 2010).

A biossecagem tem sido aplicada para diversas substâncias como esterco, lodo de estações de tratamento de águas residuárias de papel e celulose, resíduos urbanos ou de cozinha e lodo de esgoto (VELIS et al., 2009). Ademais, o processo de biossecagem também tem sido aplicado aos resíduos domiciliares ou de cozinha em conjunto com lodo de esgoto, sendo denominado co-biossecagem (MA; ZHANG; LI, 2016, ZHANG, D. et al., 2018, MA et al., 2019).

A biossecagem do lodo de esgoto é um processo recente que foi desenvolvido com o objetivo de explorar a energia do lodo, isto é, produzir um lodo com umidade reduzida, preservando o poder calorífico e adequando-o para utilização como biocombustível (NAVAEE-ARDEH; BERTRAND; STUART, 2010). A biossecagem também impacta positivamente na armazenagem e no transporte do lodo, pois durante o processo ocorre a redução de seu volume e a sua estabilização, reduzindo assim a emissão de odor durante o transporte (ZHAO et al., 2010, 2011a; HUILIÑIR; VILLEGAS, 2015; HAO; YANG; JAHNG, 2018). Assim, a biossecagem se apresenta como um processo condizente com a destinação ambientalmente adequada do lodo de ETE, ação essencial no âmbito do saneamento.

Salienta-se que nem sempre os autores de trabalhos sobre biossecagem especificam o tipo de lodo utilizado e/ou a tecnologia da ETE. No Quadro 3.9 é apresentada a sistematização dessas informações, conforme fornecidas pelos autores.

É importante ressaltar a diferença existente entre a biossecagem e a compostagem. A compostagem visa a máxima conversão da matéria orgânica pelos microrganismos para posteriormente ser utilizada na agricultura, enquanto a biossecagem visa a remoção da água e a preservação do poder calorífico do lodo para a sua utilização como biocombustível (WINKLER et al, 2013; HUILIÑIR; VILLEGAS, 2015).

Outro fator que diferencia a compostagem da biossecagem é o tempo de duração do processo, na compostagem esse tempo é entre 30 e 50 dias, enquanto a duração da biossecagem varia de 8 a 24 dias. O tempo de duração do processo de biossecagem é menor do que da compostagem, sendo um fator vantajoso para tratar grandes quantidades de lodo (ZHAO et al., 2010; YANG; ZHANG; JAHNG, 2014).

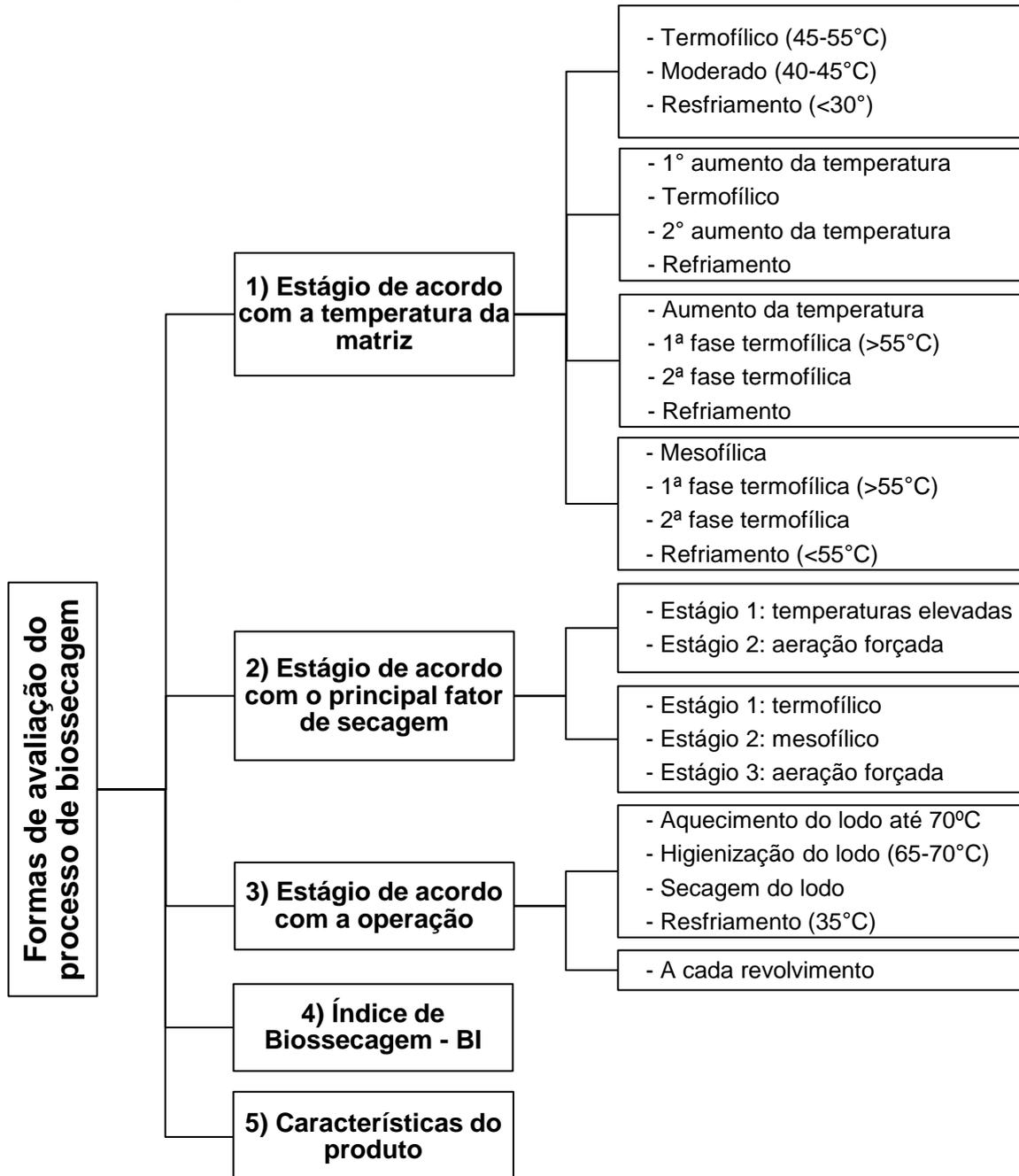
3.2.1. Formas de avaliação do processo de biossecagem do lodo de ETE

A biossecagem do lodo de esgoto tem sido analisada de diversas maneiras por diferentes autores. Examinando as pesquisas, pôde-se sistematizar e dividir essas formas de avaliação da biossecagem em 5 grupos de análise, sendo estes: 1) temperatura da matriz; 2) principal fator de secagem; 3) operação do sistema; 4) Índice de Biossecagem, e 5) características do produto, conforme apresentado na Figura 3.4.

Constatou-se também que, nas formas de avaliação 1, 2 e 3, diferentes autores usam métricas distintas para avaliar a forma de análise. Essas métricas são apresentadas na terceira coluna da Figura 3.4.

Cabe ressaltar que é possível avaliar um mesmo processo de biossecagem por uma ou mais formas de análise, permitindo, assim, uma avaliação mais completa do processo e a comparação com outros resultados.

Figura 3.4 – Formas de avaliação do processo da biossecagem do lodo de ETE de acordo com 5 grupos gerais e suas respectivas métricas de análise



Fonte: autor (2020).

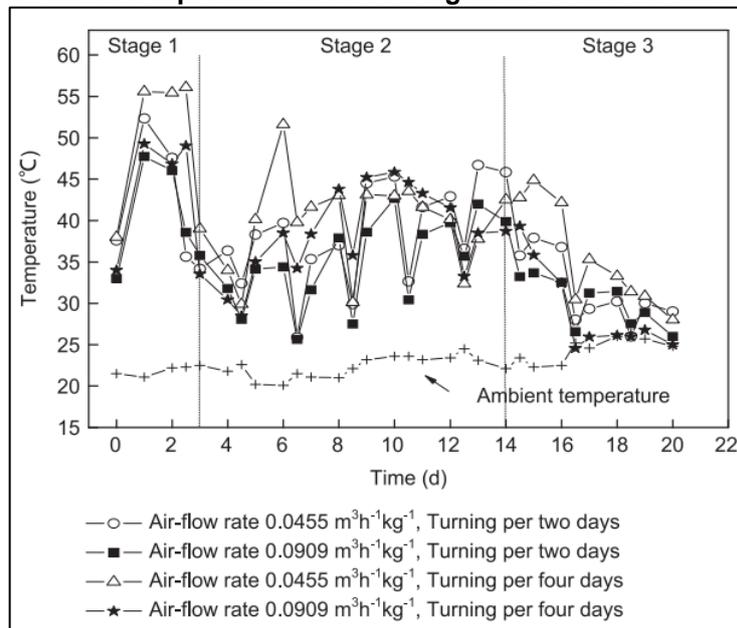
3.2.1.1. Estágios da biossecagem de acordo com a temperatura da matriz

A temperatura da matriz é o indicador mais importante do processo de biossecagem (ZHAO et. al., 2011a). Altas temperaturas da matriz (>55°C) permitem a evaporação da água e afetam a temperatura do ar que passa por ela, aumentando a sua pressão de vapor e, conseqüentemente, sua capacidade de retenção e remoção de água (NAVAEE-ARDEH; BERTRAND; STUART, 2010; ZHAO et al., 2011a).

Segundo Zhao et al. (2010), o perfil da temperatura ao longo do processo de biossecagem é similar ao padrão da temperatura na compostagem. Assim, o autor apresenta os seguintes estágios da biossecagem (Figura 3.5):

- Termofílico (45-55°C): estágio mais eficiente para a biossecagem. Em temperaturas superiores à 55°C a umidade se transforma em vapor e aumenta a pressão de vapor do fluxo de ar passando pela matriz a carregar mais umidade para fora;
- Moderado (40-45°C): fruto de substâncias específicas, que possuem degradação mais lenta do que as do estágio 1. Período mais funcional, e;
- Resfriamento (<30°C)

Figura 3.5 – Perfil da temperatura da biossecagem no estudo de Zhao et al. (2010)



Fonte: Zhao et al. (2010).

Em contrapartida, Cai et al. (2012, 2013), Yu et al. (2017) e Li et al (2018) apresentam também como fases da biossecagem os períodos de aumento de temperatura e não utilizam em sua metodologia o estágio moderado de Zhao et al. (2010). Portanto, para esses autores, a biossecagem possui quatro fases:

- Fase de aumento de temperatura;
- Fase termofílica;
- Fase secundária de aumento de temperatura;
- Fase de resfriamento.

Cai, Gao e Hong (2015) utilizam uma metodologia similar à dos autores apresentados anteriormente para caracterizar a biossecagem. Contudo, há uma alteração

de nomenclatura, não sendo utilizado “fase secundária de aumento de temperatura” e sim “fase termofílica secundária”. Deste modo, as fases da biossecagem, para Cai, Gao e Hong (2015) são:

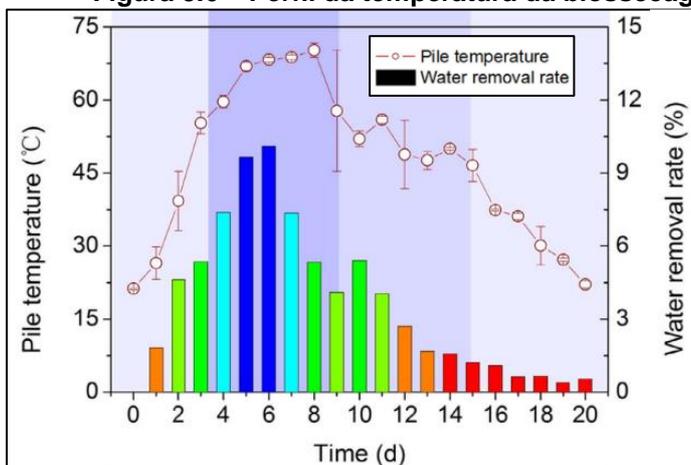
- Fase de aumento de temperatura;
- Fase termofílica inicial: temperatura da matriz superior à 55°C;
- Fase termofílica secundária;
- Fase de resfriamento.

Cai et al. (2016a, 2016b, 2017, 2018a, 2018b) e Wu et al. (2018) adotam uma metodologia similar à de Cai, Gao e Hong (2015), alterando apenas a primeira fase, conforme apresentado a seguir:

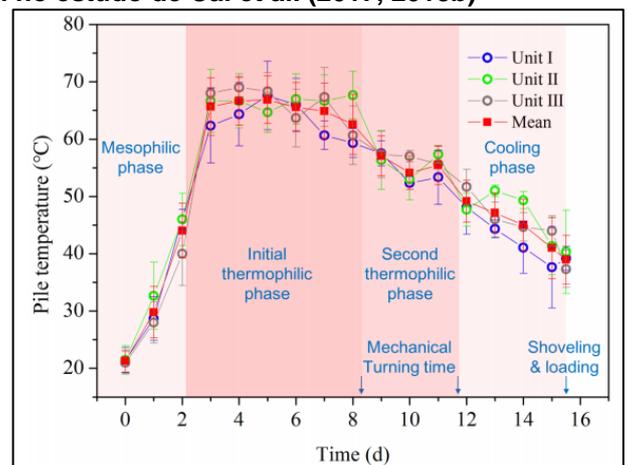
- Fase mesofílica;
- Fase termofílica inicial: temperatura da matriz é superior à 50°C;
- Fase termofílica secundária;
- Fase de resfriamento: temperatura da matriz é inferior à 50°C.

A Figura 3.6 e a Figura 3.7 apresentam graficamente essa metodologia.

Figura 3.6 – Perfil da temperatura da biossecagem no estudo de Cai et al. (2017, 2018b)



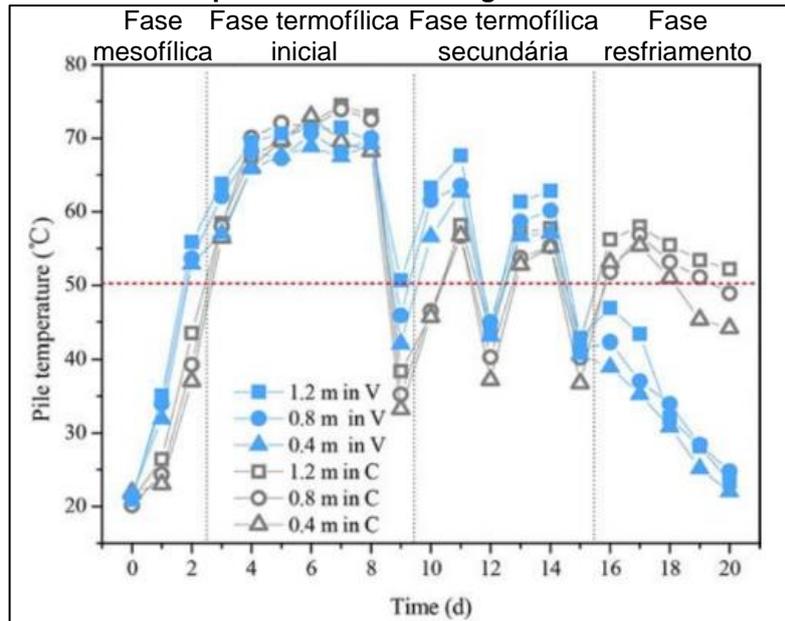
a) Cai et al. (2017).



b) Cai et al. (2018b).

Fonte: adaptado de Cai et al. (2017, 2018b).

Figura 3.7 – Perfil da temperatura da biossecagem no estudo de Wu et al. (2018)

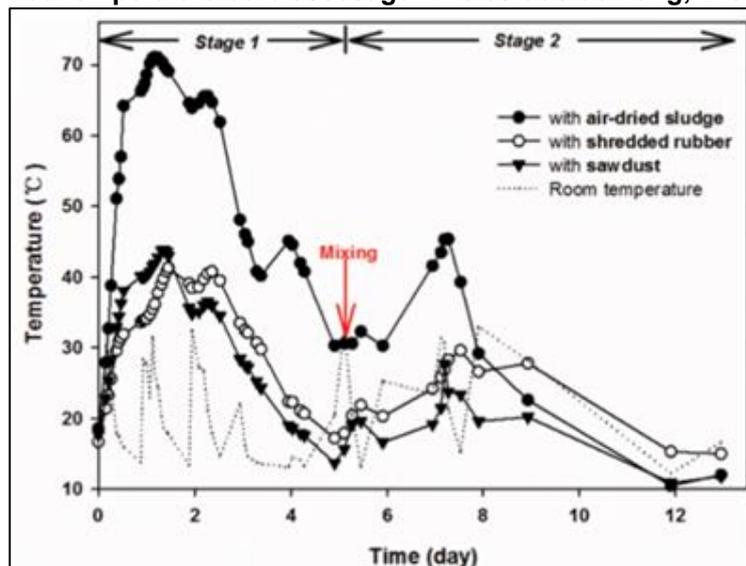


Fonte: adaptado de Wu et al. (2018).

3.2.1.2. Estágios da biossecagem de acordo com o principal fator de secagem

Yang, Zhang e Jahng (2014) definem dois estágios da biossecagem, conforme é possível observar na Figura 3.8, cujo ensaio teve duração de 13 dias. No Estágio 1, o principal fator da secagem do lodo foi as temperaturas elevadas, com duração de 5 dias. Por outro lado, a aeração forçada no Estágio 2 foi o principal fator de secagem, durante 8 dias.

Figura 3.8 – Perfil da temperatura da biossecagem no estudo de Yang, Zhang e Jahng (2014)



Fonte: Yang, Zhang e Jahng (2014).

Zhang, J. et al. (2015) adotam a mesma forma de divisão dos estágios utilizado por Yang, Zhang e Jahng (2014), contudo dividem o principal fator de secagem pela temperatura em termofílica e mesofílica, conforme apresentado a seguir:

- Estágio 1: aumento da taxa de secagem devido à aclimatação dos microorganismos, dominância das bactérias termofílicas e degradação da fração orgânica facilmente degradável (principalmente, substâncias proteicas e produtos do metabolismo microbiano);
- Estágio 2: queda exponencial da taxa de secagem devido à disponibilidade insuficiente de nutrientes para o consumo pelos microorganismos, ocorre o decréscimo das bactérias termofílicas e aumento das bactérias mesofílicas;
- Estágio 3: taxa de secagem constante devido à aeração

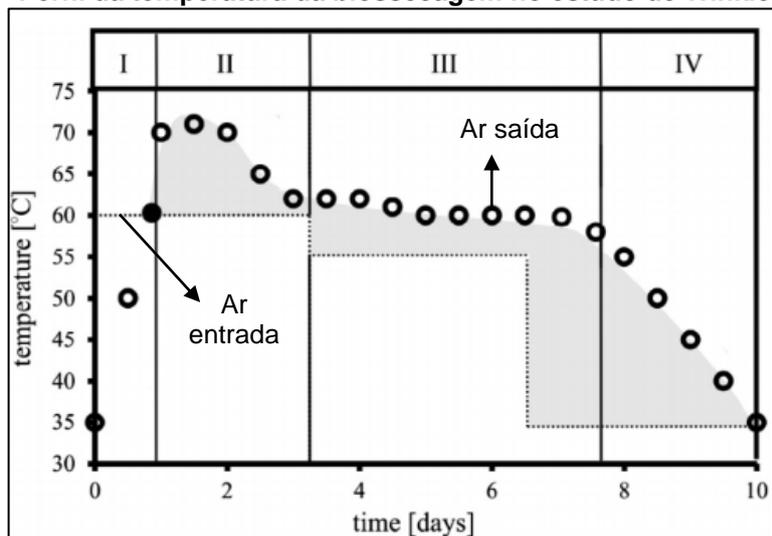
3.2.1.3. Estágios da biossecagem de acordo com a operação

Dois tipos de caracterizações dos estágios da biossecagem de acordo com a operação são apresentados na literatura.

Winkler et al. (2013) em seu estudo em escala real apresenta quatro estágios da biossecagem do lodo de esgoto (Figura 3.9):

- Aquecimento do lodo por 10 a 15h até atingir 70°C;
- Higienização do lodo por 2 dias na temperatura de 65-70°C;
- Secagem do lodo por 5 dias;
- Resfriamento do ar do processo para 35°C.

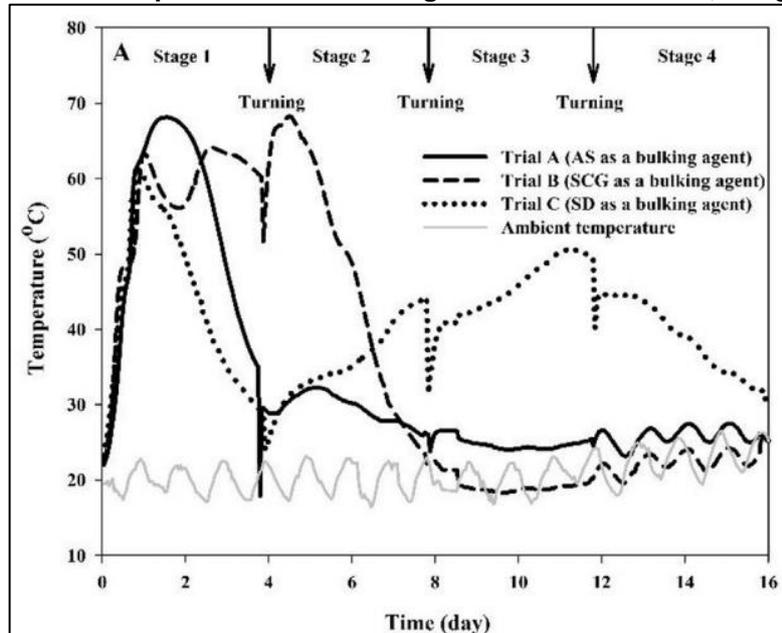
Figura 3.9 – Perfil da temperatura da biossecagem no estudo de Winkler et al. (2013)



Fonte: adaptado de Winkler et al. (2013).

Por outro lado, Hao, Yang e Jahng (2018) definiram quatro estágio de acordo com os revolvimentos realizados durante os ensaios, conforme é apresentado na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Perfil da temperatura da biossecagem no estudo de Hao, Yang e Jahng (2018)



Fonte: Hao, Yang e Jahng (2018).

3.2.1.4. Índice de Biossecagem

O Índice de Biossecagem ou *Biodrying Index* (BI) foi desenvolvido por Zhang et al.² (2008 apud HUILIÑIR; VILLEGAS, 2015) como um indicador de desempenho do processo de biossecagem conforme Equação 3.1.

$$BI = \frac{m_{H_2O}}{m_{SV \text{ consumido}}} \quad (3.1)$$

Sendo:

BI: Índice de biossecagem [adimensional];

m_{H_2O} : quantidade de água removida [kg];

$m_{SV \text{ consumido}}$: quantidade de SV consumido [kg].

No Quadro 3.4 são apresentados os valores do Índice de Biossecagem apresentados nas pesquisas. Observa-se que os valores globais de BI variam na faixa de 2,4 a 17,3, sendo o valor médio 6,2.

² ZHANG, D. -Q., HE, P. -J., JIN, T. -F., SHAO, L. -M. *Bio-drying of municipal solid waste with high water content by aeration procedures regulation and inoculation. Bioresource technology biochemistry*. v.99(18), p.8796-8802, 2008.

Segundo Hao, Yang e Jahng (2018) e Reis (2017), o teor ou quantidade de sólidos voláteis (SV) é um parâmetro aproximado de matéria orgânica e poder calorífico. Dessa forma, quanto maior o valor de SV, maior a quantidade de matéria orgânica presente e, possivelmente, maior o poder calorífico.

Portanto, quanto maior o valor de BI, maior é a remoção de água e menor é o consumo de SV. Assim, o processo de biossecagem gera um resíduo/produto com baixa umidade e poder calorífico elevado, podendo ser utilizado como biocombustível para a geração de energia.

Quadro 3.4 – Índice de Biossecagem nas pesquisas entre 2010 e 2018

| Pesquisa | Índice de Biossecagem | |
|---|---|---|
| Zhao et al. (2010) | Teste 1: 5,95 Teste 2: 5,98 Teste 3: 5,94 Teste 4: 6,05 | |
| Zhao et al. (2011a) | Teste A: 5,13** Teste B: 5,88** Teste C: 6,48** | |
| Winkler et al. (2013) | 2,39 ** | |
| Villegas e Huiliñir (2014) e Huiliñir e Villegas (2015) | Apresenta valores no gráfico. | Os valores de BI variam nos ensaios na faixa de 5 a 8,4, desconsiderando o ensaio com umidade inicial de 59%. |
| Yang, Zhang e Jahng (2014) | Valores para o Estágio 1: Teste 1: 17,4 Teste 2: 19,8 Teste 3: 5,5 Teste 4: 6,5 Teste 5: 5,6 Teste 6: 5,5 Teste 7: 6,6 Teste 8: 4,3 | Valores Globais*: Teste 1: 13,4 Teste 2: 17,3 Teste 3: 5,3 Teste 4: 5,7 Teste 5: 5,1 Teste 6: 5,0 Teste 7: 5,2 Teste 8: 3,9 |
| Hao, Yang e Jahng (2018) | Teste A: 4,78 Teste B: 4,37 Teste C: 4,81 | |

*Valor calculado com base nas informações obtidas no artigo.

** Valor apresentado no artigo de Hao, Yang e Jahng (2018).

3.2.1.5. Características do produto

A última etapa do desenvolvimento da biossecagem é o produto, isto é, o lodo biosseco ou matriz final. No Quadro 3.5 é apresentada a sistematização da caracterização físico-química do produto da biossecagem presente nas pesquisas dos últimos 10 anos, a partir de 2010.

De forma geral, o teor de umidade da matriz final da biossecagem variou de 20 a 80,8%, valores próximos ao intervalo de umidade da matriz inicial (23,8 a 81,8%). Contudo, desconsiderando os valores resultantes dos testes das pesquisas realizadas por Huiliñir e Villegas (2015) e Yang, Zhang e Jahng (2014) que tiveram umidade da

matriz inicial fora do intervalo de 50 e 70%, observa-se que o teor de umidade da matriz final varia de 33 a 77,2% e, conseqüentemente, teor de sólidos totais (ST) entre 22,8 a 67%.

Em relação aos teores de sólidos voláteis, observa-se que para a matriz final estes variam de 50,3 a 86,5%. A densidade da matriz final varia de 0,595 a 0,678 g.cm⁻³ e o FAS (*Free Air Space*) varia de 50,5 a 73,5%.

Segundo Gyllenhammer (1998)³ apud Reis (2017) e Zhao et al. (1999)⁴ apud Reis (2017), o valor mínimo de ST para utilização de um resíduo para a geração de energia por meio de processo de combustão é de 57%. Kudra et al.⁵ (2002) apud Reis et al. (2019) apontam que o valor mínimo de ST para o produto ser incinerado e produzir energia pelo processo de combustão é de 45%.

³ GYLLENHAMMAR, M. *Combustion of deinking sludge and fiber sludge in bark fired boilers. Varmeforsk report. S.E.P. Scandinavian Energy Project AB*, 1998.

⁴ ZHAO, C.; CHEN, X.; HUANG, C.; LAN, J.; DUAN, Y.; CUI, G.; WANG, W. *Fluidization and incineration of pulp and paper mill sludge in BFB. 15th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, Savannah, GA (US), 1999.

⁵ KUDRA, T., GAWRZYNSKI, Z., GLASER, R., STANISLAWSKI, J., POIRIER, M. *Drying of Pulp and Paper Sludge in a Pulsed Fluid Bed Dryer. Drying Technology. v.20, p.917-933, 2002.*

Quadro 3.5 – Caracterização físico-química do produto do processo de biossecagem presente nas pesquisas

(continua)

| Pesquisa | Massa total (kg) | U (%) b.u. | SV (%) b.s. | DQO (kg) | COT | NTK (kg) | PCS (kJ.kg ⁻¹) | PCI (kJ.kg ⁻¹) | Densidade g.cm ⁻³ | FAS (%) | pH | CE (mS.cm ⁻¹) |
|----------------------------|--|---|--|----------|------------------------------------|----------|---|----------------------------|------------------------------|--|---------------|---------------------------|
| Yang, Zhang e Jahng (2014) | - | Teste 1: 80,8 Teste 2: 73,0 Teste 3: 65,1 Teste 4: 49,7 Teste 5: 42,3 Teste 6: 36,3 Teste 7: 33,3 Teste 8: 20,0 Teste 9: 54,2 Teste 10: 60,0 Teste 11: 77,2 Teste 12: - Teste 13: - | Teste 1: 70,2 Teste 2: 70,7 Teste 3: 65,9 Teste 4: 66,8 Teste 5: 68,3 Teste 6: 68,9 Teste 7: 71,0 Teste 8: 71,0 Teste 9: 60,3 Teste 10: - Teste 11: 76,4 Teste 12: 74,7 Teste 13: 69,3 | - | - | - | - | - | - | Teste 1: 50,5 Teste 2: 53,8 Teste 3: 60,0 Teste 4: 60,3 Teste 5: 61,1 Teste 6: 61,6 Teste 7: 62,4 Teste 8: 65,1 Teste 9: - Teste 10: - Teste 11: - Teste 12: - Teste 13: - | - | - |
| Cai, Gao e Hong (2015) | - | Teste 1: 60,4 Teste 2: 56,1 Teste 3: 50,3 | Teste 1: 68,4 Teste 2: 67,3 Teste 3: 66,7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Zhang, J. et al. (2015) | - | Valores apresentados no gráfico presente no artigo. | Valores apresentados no gráfico presente no artigo. | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Cai et al. (2016a) | - | 54,7 | 66,73 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Cai et al. (2016b) | - | 39,2 | 73,1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Yu et al. (2017) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Reis (2017) | Reator C: 2,69 Reator B1: 2,48 Reator B2: 2,43 | Reator C: 55,4 Reator B1: 39,0 Reator B2: 36,9 Reator A: 54,4 Reator B: 52,6 | Reator C: 72,6 Reator B1: 82,3 Reator B2: 86,5 Reator A: 54,7 Reator B: 54,7 | - | Reator B: 290,1 mg.g ⁻¹ | - | Reator C: 10861,24 Reator B1: 14775,59 Reator B2: 17551,88 Reator B: 14661 | Reator B: 14459,915* | - | - | Reator B: 5,7 | Reator B: 0,323 |

Quadro 3.5 – Caracterização físico-química do produto do processo de biossecagem presente nas pesquisas

(conclusão)

| Pesquisa | Massa total (kg) | U (%) b.u. | SV (%) b.s. | DQO (kg) | COT | NTK (kg) | PCS (kJ.kg ⁻¹) | PCI (kJ.kg ⁻¹) | Densidade g.cm ⁻³ | FAS (%) | pH | CE (mS.cm ⁻¹) |
|--------------------------|------------------|--|--|----------|-----|----------|----------------------------|----------------------------|--|---|--|--|
| Lucatti et al. (2017) | - | Ensaio 1A: 65,5 Ensaio 1B: 68,1 Ensaio 2A: 54,6 Ensaio 2B: 66,0 Ensaio 3A: 40,1 Ensaio 3B: 47,3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Wu et al. (2018) | - | Teste V: 50,4±1,5 Teste C: 54,1±1,4 | Teste V: 76,6±0,6 Teste C: 77,5±0,9 | - | - | - | - | - | Teste V: 0,595±0,006 Teste C: 0,678±0,007 | - | Teste V: 8,03±0,13 Teste C: 8,17±0,04 | Teste V: 1,73±0,09 Teste C: 2,28±0,07 |
| Hao, Yang e Jahng (2018) | - | Teste A: 59,12 Teste B: 41,35 Teste C: 57,69 | Teste A: 69,06 Teste B: 86,17 Teste C: 82,78 | - | - | - | - | - | - | Valores apresentados no gráfico presente no artigo. | - | - |
| Almeida et al. (2019) | - | Ensaio 1: 32,5 Ensaio 2: 45,4 | Ensaio 1: 54,4 Ensaio 2: 50,3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Nota: U: umidade. SV: Sólidos Voláteis. DQO: Demanda Química de Oxigênio. COT: Carbono Orgânico Total. NT: Nitrogênio Total. NTK: Nitrogênio Total Kjeldahl. m/m: proporção mássica. v/v: proporção volumétrica. PCS: Poder Calorífico Superior. PCI: Poder Calorífico Inferior. NI: não informado. * Valores teóricos/calculados.

3.2.2. Processos da Biossecagem do lodo de ETE

A biossecagem do lodo de ETE ocorre devido aos processos biológico e físico. O processo biológico se baseia nas atividades microbianas de degradação da matéria orgânica que geram calor, permitindo a vaporização da água e facilitando a sua remoção da matriz. Já o processo físico consiste na remoção de água da matriz e nas trocas de calor.

A seguir são descritos esses dois processos e os fatores que os influenciam. Por questões didáticas serão apresentados em tópicos. Contudo, cabe ressaltar que um processo tem influência no outro e vice-versa, sendo importante analisar a biossecagem de forma sistêmica.

3.2.2.1. Processo Biológico

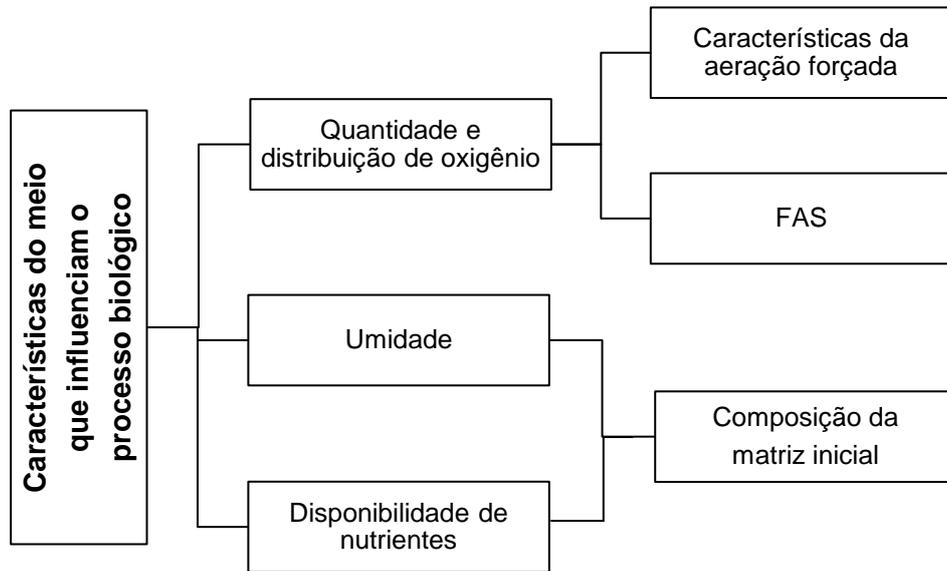
O principal processo da biossecagem se baseia nas reações biológicas, sendo que as espécies e as quantidades de microrganismos presentes na matriz inicial são um dos aspectos que determinam a taxa de degradação da matéria orgânica durante a biossecagem (YUAN et al., 2019).

Segundo Navaee-Ardeh, Bertrand e Stuart (2010), as bactérias classificadas como mesofílicas (ativas a 8-48°C) e as termofílicas (ativas a 42-68°C) são importantes para o processo de biossecagem, pois estas são ativas na faixa de temperatura do reator.

Desta forma, é essencial garantir condições adequadas de oxigênio, umidade da matriz e disponibilidade de nutriente para os microrganismos (NAVAEE-ARDEH; BERTRAND; STUART, 2010; YUAN et al., 2019). Esses 3 elementos são as principais características do meio que influenciam a biossecagem, sendo estes descritos nos itens 3.2.2.1.1, 3.2.2.1.2 e 3.2.2.1.3, respectivamente.

Na Figura 3.11 é apresentado um esquema das principais características do meio que influenciam o processo biológico da biossecagem do lodo de ETE e seus respectivos fatores.

Figura 3.11 – Esquema das principais características do meio que influenciam o processo biológico da biossecagem do lodo de ETE e seus respectivos fatores



Nota: FAS (*Free Air Space*) é relativo à porcentagem de poros ocupados apenas pelo ar na matriz.
Fonte: autor (2020).

3.2.2.1.1. Quantidade e distribuição de oxigênio

Os microrganismos aeróbios são os responsáveis pela degradação da matéria orgânica e, conseqüentemente, da geração de calor no processo de biossecagem. A respiração desses microrganismos só ocorre na presença de oxigênio. Portanto, durante a biossecagem é importante garantir que o oxigênio seja distribuído por toda a matriz. Para garantir essa condição, é necessário injetar ar durante a biossecagem. Dois fatores são importantes a serem analisados em relação à aeração: 1) a duração, o regime e a taxa da aeração da matriz, e; 2) FAS (*Free Air Space*) que é a porcentagem de poros ocupados apenas pelo ar na matriz.

- **Aeração forçada**

Para garantir oxigênio para os microrganismos, é necessário injetar ar na matriz da biossecagem. A quantidade de ar injetado, assim como a sua duração e regime, tem sido estudado por diversos autores como Zhao et al. (2010), Huiliñir e Villegas (2015), Lucatti et al. (2017), Wu et al. (2018) Almeida et al. (2019).

A taxa de aeração consiste na quantidade de ar injetada na matriz, medida em termos de vazão em $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ou $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$, pela massa de Sólidos Totais (ST) da matriz, em kg, ou pela massa da matriz, em kg, base úmida (REIS et al, 2019). Esta taxa afeta a

temperatura da matriz, podendo influenciar na evaporação de água. Pesquisas recentes demonstram que valores elevados desta taxa podem fazer com que a matriz não atinja a fase termofílica e, conseqüentemente, a secagem pode ocorrer predominantemente por fenômenos físicos, devido à aeração forçada. Em contrapartida valores baixos da taxa de aeração podem ser insuficientes para o processo aeróbio, não ocorrendo assim acréscimo de temperatura. Portanto, é fundamental no processo de biossecagem a adequação da taxa de aeração.

Além da taxa, ou seja, da quantidade de ar injetado na matriz, outras características da aeração são importantes no processo da biossecagem: 1) a duração da aeração, que descreve se a aeração é contínua ou intermitente, isto é, se durante a aeração há intervalos de pausas ou não, e; 2) o regime da aeração que descreve se a taxa (quantidade de ar) é constante ou variável ao longo da biossecagem.

Em relação à duração da aeração, estudos foram realizados utilizando duração intermitente (ZHAO et al., 2010, 2011a; WU et al., 2018) e duração contínua (YANG; ZHANG; JAHNG, 2014; HUILIÑIR; VILLEGAS, 2015; HAO; YANG; JAHNG, 2018). Todavia, não foram encontrados estudos publicados que apresentem uma comparação do desempenho da biossecagem ou da qualidade do produto biosseco considerando os dois tipos de duração da aeração.

Já em relação ao regime da aeração, Wu et al. (2018) realizaram um estudo comparativo com objetivo de analisar o desempenho da biossecagem e a estrutura da comunidade de bactérias ao realizarem dois ensaios, um com regime de aeração constante e outro com aeração variável. Os autores concluíram que a qualidade do lodo biosseco é melhor com a aeração em regime variável do que constante.

- **FAS – Free Air Space**

Além da quantidade, da duração e do regime da aeração da matriz, é importante garantir que o ar injetado consiga percorrer toda a matriz e assim, o processo de biossecagem ocorra de forma homogênea. A porosidade consiste nos espaços vazios existentes entre as partículas sólidas, que podem ser ocupados por ar e água. Nesse sentido, quanto maior a quantidade de poros ocupados por ar de uma matriz, mais homogênea é a distribuição de ar injetado.

O lodo de ETE possui baixa FAS ao ser comparado com os resíduos sólidos urbanos compostáveis, devido a sua compactação e à sua umidade excessiva, sendo um fator limitante da biossecagem (ZHAO et al., 2010, 2011a; YANG; ZHANG; JAHNG, 2014). Portanto, a utilização de *bulking agents* (materiais que potencializam o processo)

auxilia na criação e/ou no aumento do tamanho dos poros na matriz, atuando, portanto, como um material estruturante, facilitando a passagem do ar (YANG; ZHANG; JAHNG, 2014; REIS et al., 2019).

O FAS da matriz ao longo do processo de biossecagem é influenciada por dois fatores: 1) a remoção de água que aumenta a quantidade de poros ocupados pelo ar, e; 2) a degradação da matéria orgânica que provoca o colapso da matriz, diminuindo a quantidade desses poros. Portanto, a quantidade de poros ocupados pelo ar da matriz ao longo do processo é determinada pelo efeito simultâneo desses dois fatores (ZHAO et al., 2011a; YANG; ZHANG; JAHNG, 2014).

Assim, para uma boa distribuição de ar ao longo do processo de biossecagem do lodo de esgoto, é importante quantificar a quantidade de poros ocupados apenas por ar (FAS) (ZHAO et al., 2011a; YANG; ZHANG; JAHNG, 2014). A fórmula de cálculo do FAS é apresentada a seguir na Equação 3.2.

$$FAS = \left\{ 1 - BD * \left[\frac{1 - \frac{ST}{100}}{d_{H2O}} + \frac{\frac{ST}{100} * \frac{SV}{100}}{d_{SV}} + \frac{\frac{ST}{100} * \left(1 - \frac{SV}{100} \right)}{d_{inor}} \right] \right\} * 100 \quad (3.2)$$

Sendo:

FAS: porcentagem de poros ocupados apenas pelo ar [%];

BD: densidade da matriz [kg.m⁻³];

d_{H2O}: densidade da água [kg.m⁻³];

d_{sv}: densidade da fração volátil [kg.m⁻³];

d_{inor}: densidade da fração inorgânica [kg.m⁻³];

ST: Sólidos totais [%];

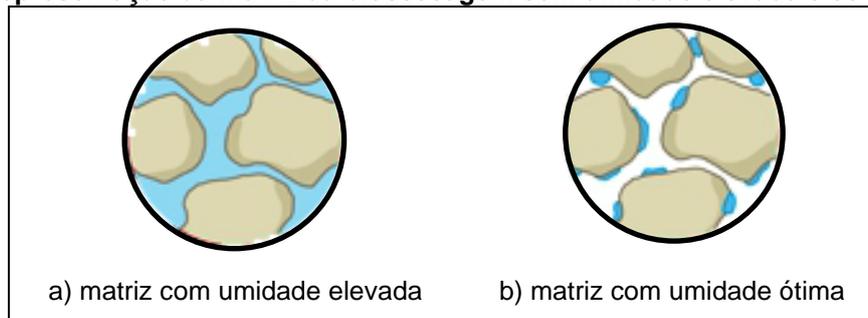
SV: Sólidos voláteis [%].

3.2.2.1.2. Umidade

Os microrganismos necessitam de água para realizar reações de degradação da matéria orgânica. Contudo, caso a umidade da matriz da biossecagem for elevada, os poros da matriz estarão saturados (Figura 3.12a), não havendo assim espaços livres para a movimentação do ar e, conseqüentemente, o oxigênio não estará disponível para os microrganismos aeróbios, impactando assim negativamente o processo de biossecagem (YANG; ZHANG; JAHNG, 2014).

Como o lodo de ETE possui alta umidade, se comparado aos resíduos sólidos urbanos (ZHAO et al., 2010, 2011a), é necessário deixá-lo secar e/ou adicionar *bulking agents* que possuem teores menores de umidade para que a matriz alcance a umidade adequada ou ótima. Segundo Yang, Zhang e Jahng (2014) umidade ótima representa a relação entre as necessidades microbianas de água (umidade) e de suprimento adequado de oxigênio, conforme apresentado na Figura 3.12b.

Figura 3.12 – Representação da matriz da biossecagem com umidade elevada e com umidade ótima



Fonte: autor (2020).

Estudos foram realizados para a identificação da umidade inicial ótima para o processo de biossecagem. Segundo Yang, Zhang e Jahng (2014), a umidade inicial ótima da matriz (lodo desaguado e *bulking agents*) varia entre 50 e 70%. Huiliñir e Villegas (2015) avançaram nessa temática e apontaram que a umidade inicial da matriz de 68% resulta em maiores valores de temperatura e maior remoção de umidade.

3.2.2.1.3. Disponibilidade de Nutrientes

O terceiro fator que influencia as reações biológicas é a disponibilidade de nutrientes. O lodo de ETE, se comparado aos resíduos sólidos urbanos, contém poucas substâncias orgânicas biodegradáveis, isto é, há poucos nutrientes para as atividades microbianas, sendo, portanto, um fator limitante da biossecagem do lodo de esgoto (ZHAO et al., 2010, 2011a). Portanto, faz-se necessário adicionar outras fontes de nutrientes (*bulking agents*) para potencializar o processo de biossecagem do lodo.

Zhao et al. (2011a) realizaram um estudo para avaliar a biodegradabilidade dos *bulking agents* e suas contribuições para a geração biológica de calor, pois a maioria dos estudos até aquele momento não consideravam esse fator ao analisar a melhora do processo de biossecagem após a adição dos *bulking agents*. Cabe ressaltar que esses estudos apontavam que a melhora do processo de biossecagem ocorria apenas pela otimização da estrutura física da matriz, isto é, os *bulking agents* apenas tinham a função estrutural, não sendo fonte de nutrientes e compostos biodegradáveis. O estudo realizado

por Zhao et al. (2011a) é um marco importante, pois a partir deste foi possível estabelecer as três funções dos *bulking agents*: 1) estruturante; 2) fonte de nutrientes e matéria orgânica, e; 3) adequação da umidade da matriz.

Segundo de Guardia, Petiot e Rogeau (2008), os materiais compostáveis podem ser divididos de acordo com sua biodegradabilidade, conforme apresentado a seguir:

- Fração facilmente biodegradável;
- Fração lentamente biodegradável, necessita de uma fase de hidrólise antes do consumo metabólico, e;
- Fração inerte.

Além dessa classificação, é possível classificar os compostos orgânicos de acordo com a sua bioacessibilidade pelo método modificado de distribuição das frações do Van Soest, no qual as frações são divididas em:

- Fração solúvel em água quente (W100°C);
- Fração solúvel (SOL);
- Hemicelulose (HEM);
- Celulose (CEL);
- Lignina (LIG);
- Cinza ou matéria mineral (ASH).

O estudo realizado por Zhao et al. (2011a) observou, ao comparar o consumo de oxigênio durante a degradação de *bulking agents* e do lodo, que há um pico de consumo de oxigênio no início da degradação do lodo não se repetindo ao longo do tempo. Esse resultado sugere que a duração da biossecagem apenas do lodo é curta sendo necessário a adição de *bulking agents* que proporcionem matéria orgânica para os microrganismos e conseqüentemente ocorra a geração de calor. Além disso, os autores concluíram que a fração lentamente biodegradável advém dos *bulking agents* ao invés do lodo de esgoto.

Outro estudo realizado por Zhao et al. (2011b) analisou a biodegradação dos *bulking agents* e do lodo por meio da distribuição do carbono (C) e do Nitrogênio (N) nas frações solúveis desses materiais. Para o lodo, o principal consumo de C foi nas frações solúveis, indicando que o C nessas frações são mais facilmente utilizados pelos microrganismos. Para a palha, as frações HEM e CEL contribuíram para o consumo de C, mas contribuíram pouco para o consumo de N, corroborando com a análise de que as frações de HEM e CEL da palha tem a tendência de se transferir para outra fração mais

solúvel. A serragem sofreu pouca degradação no estudo realizado pelos autores, sendo que os valores baixos de C na fração solúvel à 35°C e de N foram a principal razão para a baixa biodegradabilidade da serragem.

3.2.2.2. Processo Físico

Os processos predominantemente físicos da biossecagem do lodo de ETE podem ser divididos em duas categorias: 1) **remoção de água**, que depende das atividades microbianas, do revolvimento e da capacidade de remoção da água pela aeração forçada, e; 2) **troca de calor**, sendo esse gerado pelas atividades microbianas, podendo ser consumido em forma de calor sensível e latente e/ou dissipado pela radiação, condução e revolvimento.

3.2.2.2.1. Remoção de água – Balanço de massa de água

O calor gerado pelo processo biológico de degradação da matéria orgânica evapora a água (fase líquida), que é carregada para fora da matriz pela aeração forçada no processo de biossecagem. Desta forma, além da aeração forçada ser necessária para a demanda de oxigênio dos microrganismos, esta também auxilia na remoção de água da matriz (ZHANG, J. et al., 2015). O ar conforme passa pela matriz, atinge sua saturação e assim remove água para fora da matriz, reduzindo a umidade (NAVAEE-ARDEH; BERTRAND; STUART, 2010).

O processo de biossecagem ocorre em batelada, na qual o balanço da quantidade de água na biossecagem é resultante da quantidade de água inicial e final da matriz, da água produzida pelo metabolismo microbiano, da água removida pela evaporação e da água removida pelo revolvimento, conforme apresentado na Equação 3.3.

$$M_{\text{água},i} - M_{\text{água},f} = M_{\text{água},\text{evap}} + M_{\text{água},\text{revol}} - M_{\text{água},\text{metab}} \quad (3.3)$$

Sendo:

$M_{\text{água},i}$: massa inicial de água na matriz (kg);

$M_{\text{água},f}$: massa final de água na matriz (kg);

$M_{\text{água},\text{evap}}$: massa de água removida pela evaporação (kg);

$M_{\text{água},\text{revolv}}$: massa de água removida pelo revolvimento (kg);

$M_{\text{água},\text{metab}}$: massa de água gerada pelo metabolismo microbiano (kg).

A massa de água na matriz pode ser calculada multiplicando a umidade (%) pela massa total (kg) da matriz no início e no final do processo de biossecagem.

A massa de água removida pela evaporação é calculada com base na massa da vazão de ar seco e da umidade absoluta do ar de entrada e de saída, conforme apresentado nas equações do Quadro 3.6.

Quadro 3.6 – Equações utilizadas para o cálculo de massa de água removida pela evaporação

| Equação | Fórmula | Nomenclatura |
|---|---|---|
| Massa de água removida pela evaporação | $M_{\text{água, evap}} = \int_{t_i}^{t_f} F_{da}(t) * (Y_i - Y_f) dt$ (3.4) | F_{da} : massa da vazão de ar seco; Y_i : umidade absoluta do ar de entrada; Y_f : umidade absoluta do ar de saída. |
| Massa da vazão de ar seco | $F_{da}(t) = \frac{Q_{ar}}{\left(\frac{1}{MM_{ar}} + \frac{1}{MM_{\text{água}}}\right) * R * T_{ar, entrada}(t)}$ (3.5) | Q_{ar} : vazão de entrada de ar; MM_{ar} : massa molecular do ar (g.mol ⁻¹) (28,97 g.mol ⁻¹) (TREYBAL ⁶ , 1986 apud HUILIÑIR; VILLEGAS, 2015); MM_{água} : massa molecular da água (g.mol ⁻¹) (18,02 g.mol ⁻¹) (TREYBAL, 1986 apud HUILIÑIR; VILLEGAS, 2015); R : constante universal dos gases (atm.L.K ⁻¹ .mol ⁻¹) (0,083 atm.L.K ⁻¹ .mol ⁻¹) (TREYBAL, 1986 apud HAO; YANG; JAHNG, 2018); T_{ar, entrada} : temperatura da umidade do ar de entrada. |
| Umidade específica do ar | $Y = \frac{MM_{\text{água}}}{MM_{ar}} * \left(\frac{P_{v, \text{água}}}{P_{absoluto} - P_{v, \text{água}}} \right)$ (3.6) | MM_{ar} : massa molecular do ar (g.mol ⁻¹) (28,97 g.mol ⁻¹) (TREYBAL, 1986 apud HUILIÑIR; VILLEGAS, 2015); MM_{água} : massa molecular da água (g.mol ⁻¹) (18,02 g.mol ⁻¹) (TREYBAL, 1986 apud HUILIÑIR; VILLEGAS, 2015); P_{v, água} : pressão de vapor d'água no ar em uma temperatura específica; P_{abs} : pressão absoluta do gás (supostamente 1 atm). |
| Pressão de vapor | $P_{v, \text{água}} = UR * P_{vs, \text{água}}$ (3.7) | UR : umidade relativa (%); pressão de saturação de vapor d'água. |
| Equação de Antoine (HUILIÑIR; VILLEGAS, 2015) | $\log_{10} P_{vs, \text{água}} = 8,896 \frac{2238}{T(^{\circ}K)}$ (3.8) | T : temperatura da umidade do ar de entrada (°K). |

Fonte: Zhao et al. (2010), Huiliñir e Villegas (2015) e Hao, Yang e Jahng (2018).

⁶ TREYBAL, R. *Mass Transfer Operations*. McGraw-Hill. México, 1986.

A água gerada pelo metabolismo microbiano pode ser calculada considerando que toda água é gerada apenas pelo processo de oxidação dos SV, conforme apresenta na Equação 3.4 (HUILIÑIR; VILLEGAS, 2015).

$$M_{\text{água,metab}} = SV_{\text{consumido}} * Y_{H_2O/SV} \quad (3.9)$$

Sendo:

SV_{consumido}: SV consumidos (g);

Y_{H₂O/SV}: coeficiente de geração de água pelo metabolismo microbiano ao consumir SV.

A massa de água removida pelo revolvimento é calculada pela Equação 3.3, apresentada anteriormente.

3.2.2.2.2. Troca de Calor – Balanço de energia

O calor no processo de biossecagem é gerado pelas atividades microbianas de degradação da matéria orgânica. Os fatores que afetam as atividades microbianas são apresentados no item 3.2.2.1.

A energia gerada pelas reações biológicas pode ser calculada com base no consumo de sólidos voláteis, conforme Equação 3.10.

$$Q_{\text{bio}} = \Delta SV * H_c = SVB * H_c \quad (3.10)$$

Sendo:

Q_{bio} ou **Q_{sv}**: calor gerado pelas reações biológicas de degradação dos SV (kJ);

ΔSV: Consumo de SV (kg);

SVB: SV biodegradáveis (kg);

H_c: calor de combustão SVB (kJ.kg⁻¹) (H_{c SVB} = 21.000 kJ.kg⁻¹) (ZHAO et al., 2010).

Segundo Zhao et al. (2010), He et al. (2013) e Huiliñir e Villegas (2015), no processo de biossecagem toda a energia provém das reações biológicas e esta é consumida ou dissipada (Equação 3.11), conforme fluxograma apresentado na Figura 3.13.

$$Q_{\text{bio}} = Q_{\text{Consumida}} + Q_{\text{dissipada}} \quad (3.11)$$

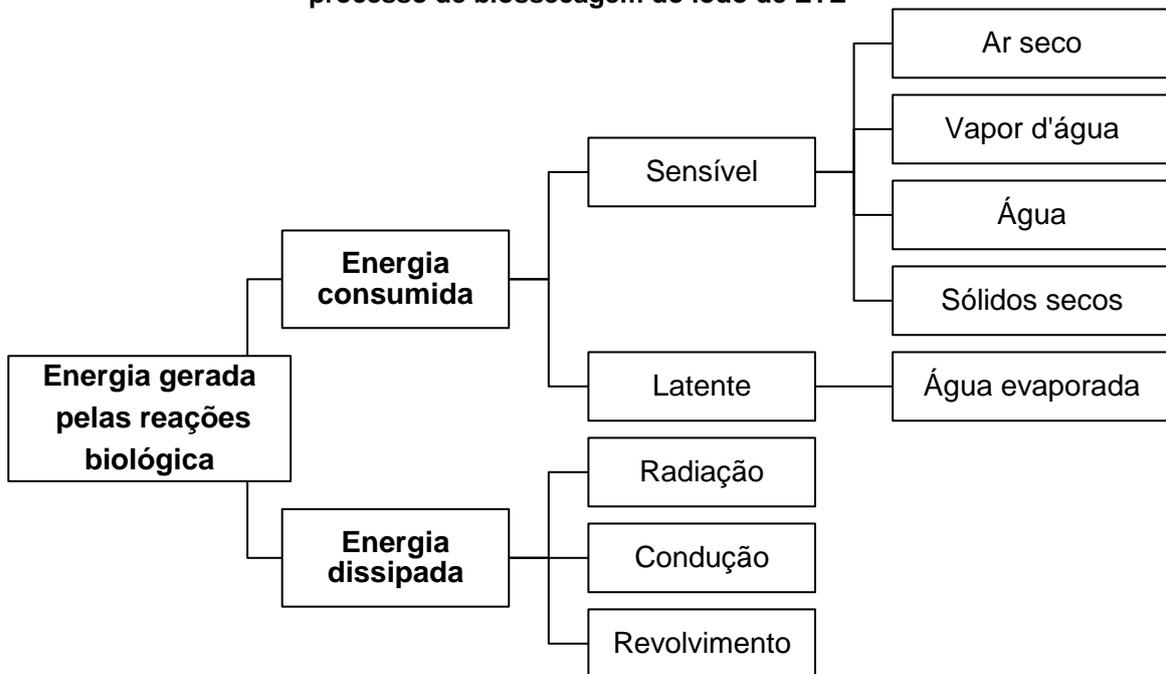
Sendo:

Q_{bio} ou Q_{sv} : calor gerado pelas reações biológicas de degradação dos SV (kJ);

$Q_{consumida}$: energia consumida no processo (kJ);

$Q_{dissipada}$: energia dissipada no processo (kJ).

Figura 3.13 – Esquema do consumo e da dissipação de energia gerada pelas reações biológicas no processo de biossecagem do lodo de ETE



Fonte: autor (2020).

A energia gerada pelas reações biológicas é consumida pelo calor sensível do ar seco, do vapor d'água, da água e dos sólidos secos e pelo calor latente da água evaporada, conforme Equação 3.12.

$$Q_{consumida} = Q_{ar\ seco} + Q_{\acute{a}gua\ vap} + Q_{\acute{a}gua} + Q_{s\acute{o}lido} + Q_{evapo} \quad (3.12)$$

Sendo:

$Q_{ar\ seco}$: calor sensível consumido pelo ar seco (kJ).

$Q_{\acute{a}gua\ vap}$: calor sensível consumido pelo vapor d'água (kJ);

$Q_{\acute{a}gua}$: calor sensível consumido pela água (kJ);

$Q_{s\acute{o}lido}$: calor sensível consumido pelos sólidos secos (kJ);

Q_{evapo} : calor latente consumido pela água evaporada (kJ).

No Quadro 3.7 são apresentadas as equações utilizadas para o cálculo de cada variável da energia consumida.

Quadro 3.7 – Equações utilizadas para o cálculo da energia consumida

| Equação | Fórmula | Nomenclatura |
|---|--|---|
| Calor sensível consumido pelo ar seco | $Q_{ar\ seco} = M_{ar} * C_{ar\ seco} * (T_m - T_a)$ (3.13) ou $Q_{ar\ seco} = C_{ar\ seco} * \int_{t_i}^{t_f} F_{da}(t) * (T_{ar,saída} - T_{ar,entrada}) dt$ (3.14) | M_{ar} : massa de ar seco (kg); C_{ar seco} : calor específico do ar seco (1,004 kJ.kg ⁻¹ .°C ⁻¹)*; T_m : temperatura da matriz (°C); T_a : temperatura ambiente (°C). F_{da} : massa da vazão de ar seco; T_{ar,saída} : temperatura da umidade do ar de saída; T_{ar,entrada} : temperatura da umidade do ar de entrada. |
| Calor sensível consumido pelo vapor d'água | $Q_{água\ vap} = M_{ar} * \omega * C_{água\ vap} * (T_m - T_a)$ (3.15) ou $Q_{água\ vap} = C_{água\ vap} * \int_{t_i}^{t_f} (F_{da}(t) * Y_f(t) * T_{ar,saída}(t) - F_{da}(t) * Y_i(t) * T_{ar,entrada}(t)) dt$ (3.16) | M_{ar} : massa de ar seco (kg); ω : peso do vapor d'água na base de ar seco (kgH ₂ O.kg ⁻¹ ar seco); C_{água vap} : calor específico do vapor d'água (1,841 kJ.kg ⁻¹ .°C ⁻¹)*; T_m : temperatura da matriz (°C); T_a : temperatura ambiente (°C); F_{da} : massa da vazão de ar seco; Y_i : umidade absoluta do ar de entrada; Y_f : umidade absoluta do ar de saída; T_{ar,saída} : temperatura da umidade do ar de saída; T_{ar,entrada} : temperatura da umidade do ar de entrada. |
| Calor sensível consumido pela água | $Q_{água} = M_{água} * C_{água} * \Delta T_m$ (3.17) | M_{água} : massa de água no material (kg); C_{água} : calor específico da água (4,184 kJ.kg ⁻¹ .°C ⁻¹)*; ΔT_m : variação da temperatura da matriz (°C). |
| Calor sensível consumido pelos sólidos secos da matriz | $Q_{sólido} = M_{sólido} * C_{sólido} * \Delta T_m$ (3.18) | M_{sólido} : massa de sólidos secos no material (kg); C_{sólido} : calor específico dos sólidos secos (1,046 kJ.kg ⁻¹ .°C ⁻¹)*; ΔT_m : variação da temperatura da matriz (°C). |
| Calor latente da água evaporada | $Q_{evapo} = M_{eva} * L_{lat\ água}$ (3.19) ou $Q_{evapo} = \int_{t_i}^{t_f} F_{da}(t) * \lambda_{evap}(t) dt$ (3.20) | Q_{evap} : calor latente da água evaporada (kJ); M_{eva} : Massa de água evaporada (kg); L_{lat água} ou λ_{evap} : calor latente da água (kJ.kg ⁻¹). |
| Calor latente da água evaporada | $L_{lat\ água} = \left[1093,7 - 0,5683 * \frac{(T+32)}{5} * 9 \right] * \frac{1055}{454}$ (3.21) | L_{lat água} ou λ_{evap} : calor latente da água (kJ.kg ⁻¹); T : temperatura média da matriz (°C). |

Nota: *ZHAO et al. (2010).

Fonte: Zhao et al. (2010), Huiliñir e Villegas (2015) e Hao, Yang e Jahng (2018).

A energia biológica é dissipada por radiação, condução e revolvimento da matriz, conforme apresentado na Equação 3.22.

$$Q_{dissipada} = Q_{radi} + Q_{condu} + Q_{revolv} \quad (3.22)$$

Sendo:

Q_{radi} : calor dissipado por radiação (kJ);

Q_{condu} : calor dissipado por condução (kJ);

Q_{revolv} : calor dissipado pelo revolvimento (kJ).

No Quadro 3.8 são apresentadas as equações utilizadas para o cálculo de cada variável da energia dissipada.

Quadro 3.8 – Equações utilizadas para o cálculo da energia dissipada

| Equação | Fórmula | Nomenclatura |
|-------------------------------------|---|--|
| Energia dissipada por radiação | $Q_{rad} = \sigma * A_{top} * F_a * F_e * (T_t^4 - T_a^4) \quad (3.23)$ | σ : constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-11} \text{ kJ.s}^{-1}\text{m}^{-2}\text{K}^{-4}$) (AHN et al., 2007 ⁷ apud HUILIÑIR; VILLEGAS, 2015); A_{top} : área da superfície de radiação do corpo (m^2); F_a : fator de configuração para levar em conta para a posição relativa e geometria dos objetos (0,5, adimensional) (AHN et al., 2007 apud HUILIÑIR; VILLEGAS, 2015); F_e : fator de emissividade para levar em conta para corpos de radiação não negros (0,85, adimensional) (AHN et al., 2007 apud HUILIÑIR; VILLEGAS, 2015). T_t : temperatura da superfície do topo da matriz ($^{\circ}\text{C}$); T_a : temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$). |
| Energia dissipada por condução | $Q_{condu} = U * A * (T_m - T_a) \quad (3.24)$ | U_{calor} : coeficiente da transmissão de calor da parede ($0,5 \times 10^4 \text{ kJ.d}^{-1}\text{m}^{-2}\text{C}^{-1}$)*; A : Superfície da parede do reator (m^2); T_m : temperatura da matriz ($^{\circ}\text{C}$); T_a : temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$). |
| Energia dissipada pelo revolvimento | $Q_{revolv} = M_{\acute{a}gua} * C_{\acute{a}gua} * (T_m - T_a) + M_{s\acute{o}lido} * C_{s\acute{o}lido} * (T_m - T_a) \quad (3.25)$ | $M_{\acute{a}gua}$: massa de água no material (kg); $C_{\acute{a}gua}$: calor específico da água ($4,184 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{.}^{\circ}\text{C}^{-1}$)*; T_m : temperatura da matriz ($^{\circ}\text{C}$); T_a : temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$); $M_{s\acute{o}lido}$: massa de sólidos secos no material (kg); $C_{s\acute{o}lido}$: calor específico dos sólidos secos ($1,046 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{.}^{\circ}\text{C}^{-1}$)*. |

Nota: *ZHAO et al. (2010).

Fonte: Zhao et al. (2010), Huiliñir e Villegas (2015) e Hao, Yang e Jahng (2018).

⁷ AHN, H. K., RICHARD, T. L., CHOI, H. L. *Mass and thermal balance during composting of a poultry manure-wood shavings mixture at different aeration rates. Process biochemistry.* v.42(2), p.215-223, 2007.

3.2.3. Desenvolvimento e operação da Biossecagem do lodo de ETE

O desenvolvimento e a operação da biossecagem se baseiam em três etapas principais: 1) preparação da matriz inicial; 2) procedimentos operacionais durante o processo de biossecagem, e; 3) produto.

3.2.3.1. Preparação da Matriz Inicial

A matriz inicial da biossecagem é composta por lodo e *bulking agents*, pois o lodo de uma forma geral possui diversas características limitantes para a biossecagem, baixa quantidade de poros ocupados pelo ar, alto teor de umidade e baixa quantidade de nutrientes, sendo necessário a adição de compostos e materiais que auxiliem no processo, os *bulking agents*.

No Quadro 3.9 é apresentada a sistematização da origem do lodo utilizado nas pesquisas de biossecagem. Observa-se que o lodo utilizado nas pesquisas possui origens distintas, demonstrando a versatilidade da aplicação do processo de biossecagem para diferentes tipos de lodo. Algumas pesquisas utilizam lodos provenientes do tratamento conjunto de esgoto doméstico e industrial. Algumas pesquisas apenas citam às ETEs nas quais o lodo foi gerado, sem descrever o sistema de tratamento de esgoto ou do lodo. Três pesquisas descrevem o sistema de tratamento do esgoto, nove pesquisas apresentam o processo de gerenciamento do lodo e oito pesquisas descrevem a origem do lodo (secundário, primário ou misto).

No Quadro 3.10 é apresentada a sistematização das características físico-químicas do lodo utilizado nas pesquisas de biossecagem a partir do ano de 2010. É possível observar que não há uma padronização dos parâmetros analisados, sendo que o único parâmetro recorrente na literatura é o teor de umidade do lodo, que varia de 61,8 a 88,25%, valores semelhantes aos apresentados no Quadro 3.10. Os sólidos voláteis do lodo variam de 46,6 a 85,2% e a densidade do lodo utilizado nas pesquisas possui pouca variação, sendo seu valor médio igual a $1,034 \text{ g.cm}^{-3}$.

Quadro 3.9 – Origem do lodo utilizado nas pesquisas de biossecagem

(continua)

| Pesquisa | Origem | Tipo de Lodo |
|---|--|--|
| Zhao et al. (2010) | Estação Municipal de Tratamento de Águas Residuais localizada em <i>Shanghai</i> , China. Trata 75.000 m ³ .d ⁻¹ de água residuais, sendo 93% doméstico e 7% industrial, usando um processo: anaeróbio-anóxico-óxico. O lodo foi desaguado em uma centrífuga com adição de agentes orgânicos floclulantes. | Lodo anaeróbio-anóxico-óxico após desaguamento em centrífuga |
| Navaee-Ardeh, Bertrand e Stuart (2010) | Estação de Tratamento de Lodo de Águas Residuais localizada em <i>Eastern Canadian TMP pul and papear mil.</i> Mistura de lodo primário (45% b.s.) e secundário (55% b.s.). | Lodo misto |
| Zhao et al. (2011a) | Estação Municipal de Tratamento de Águas Residuais localizada em <i>Shanghai</i> , China. Trata 75.000 m ³ .d ⁻¹ de água residuais, sendo 93% doméstico e 7% industrial, usando um processo: anaeróbio-anóxico-óxico. O lodo foi desaguado em uma centrífuga com adição de agentes orgânicos floclulantes. | Lodo anaeróbio-anóxico-óxico após desaguamento em centrífuga |
| Cai et al. (2012, 2013) | Estação Municipal de Tratamento de Águas Residuais localizada em <i>Qinhuangdao</i> , China. | - |
| Winkler et al. (2013) | Lodo principalmente municipal e pequenas proporções industriais de estações de tratamento de águas residuárias (secundário com e sem digestão). | Lodo secundário com e sem digestão |
| Villegas e Huiliñir (2014) e Huiliñir e Villegas (2015) | Estação de Tratamento de Águas Residuais de um matadouro localizada em Puente Alto, Santiago, Chile. Lodo secundário foi desaguado por um filtro prensa com adição de agentes orgânicos floclulantes. | Lodo secundário após desaguamento em filtro prensa |
| Yang, Zhang e Jahng (2014) | Estação de Tratamento de Águas Residuais localizada em <i>Yongin, Korea</i> . O lodo foi desaguado em uma prensa desaguadora. | Lodo desaguado em prensa desaguadora |
| Cai, Gao e Hong (2015) | Estação Municipal de Tratamento de Águas Residuais e uma pequena proporção de lodo industrial, localizadas em <i>Shenyang</i> , China. | - |
| Zhang, J. (2015) | Estação Municipal de Tratamento de Águas Residuais localizada em <i>Qinhuangdao</i> , China. | - |
| Cai et al. (2016a) | Estação de Tratamento de Lodo de Esgoto localizada em <i>Shanghai</i> , China. | - |
| Cai et al. (2016b) | Estação de Tratamento de Lodo de Esgoto localizada em <i>Shanghai</i> , China. | - |
| Yu et al (2017) | Estação Municipal de Tratamento de Águas Residuais e uma pequena proporção de lodo industrial, localizadas em <i>Shenyang</i> , China. | - |
| Reis (2017) | Estação de Tratamento de Esgotos <i>Bèsos</i> de Barcelona Espanha. Lodo desaguado em centrífuga, proveniente de tratamento anaeróbio/anóxico/aeróbio. | Lodo anaeróbio/anóxico/aeróbio desaguado em centrífuga |
| | Estação de Tratamento de Esgotos ETE Monjolinho, São Carlos-SP. Lodo anaeróbio desaguado em leito de drenagem. | . Lodo anaeróbio desaguado em leito de drenagem |
| Lucatti et al. (2017) | Estação de Tratamento de Esgotos ETE Monjolinho, São Carlos-SP. Lodo anaeróbio desaguado em leito de drenagem, sem adição de polímero. | Lodo anaeróbio desaguado em leito de drenagem |
| Wu et al. (2018) | Estação de tratamento de lodo de esgoto localizada em <i>Qinhuangdao</i> , China. | - |

Quadro 3.9 – Origem do lodo utilizado nas pesquisas de biossecagem

(conclusão)

| Pesquisa | Origem | Tipo de Lodo |
|--------------------------|---|--|
| Hao, Yang e Jahng (2018) | Estação de Tratamento de Águas Residuais localizada em <i>Yongin, Korea</i> . O lodo foi desaguado em uma prensa desaguadora. | Lodo desaguado em prensa desaguadora |
| Almeida et al. (2019) | Estação de Tratamento de Esgotos localizada no interior do Estado de São Paulo. Esta estação possui tratamento anaeróbio por reator UASB (<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>) seguido de processo físico-químico, sendo que o lodo desaguado foi coletado após o sistema de desaguamento mecânico (centrífuga). | Lodo anaeróbio seguido de físico-químico e desaguado em centrífuga |

Quadro 3.10 – Caracterização físico-química do lodo utilizado nas pesquisas de biossecagem

(conclusão)

| Pesquisa | U (%) b.u. | SV (%) b.s. | CT (%) b.s. | COT (%) b.s. | NT (%) b.s. | NTK (%) b.s. | C/N | Valor calorífico b.s. | PCS (kJ.kg ⁻¹) | PCI (kJ.kg ⁻¹) | Densidade (g.cm ⁻³) | pH | CE (mS.cm ⁻¹) |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------|---------------------------|
| Lucatti et al. (2017) Ensaio 2 | 73,9 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Lucatti et al. (2017) Ensaio 3 | 61,8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Wu et al. (2018) | 83,5 ±0,4 | 68,3 ±0,3 | - | - | - | - | - | - | - | - | 1,020 ±0,0051 | 6,77 ±0,08 | 1,85 ±0,03 |
| Hao, Yang e Jahng (2018) | 85,30 ±0,50 | 75,62 ±0,05 | - | - | - | - | - | - | 17,225 ±55 | 598 ±8 | 1,04 ±0,62 | - | - |
| Almeida et al. (2019) Ensaio 1 | 77,6 | 54,0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Almeida et al. (2019) Ensaio 2 | 72,7 | 46,6 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Nota: U: umidade. SV: Sólidos Voláteis. CT: Carbono Total. COT: Carbono Orgânico Total. NT: Nitrogênio Total. NTK: Nitrogênio Total Kjeldahl. PCS: Poder Calorífico Superior. PCI: Poder Calorífico Inferior. CE: Condutividade Elétrica. b.u.: base úmida. b.s.: base seca.

Para além dos parâmetros contidos no Quadro 3.10, Hao, Yang e Jahng (2018) caracterizam a matéria orgânica dissolvida e os elementos presentes no lodo, conforme apresentado no Quadro 3.11.

Quadro 3.11 – Características da matéria orgânica dissolvida e dos elementos do lodo utilizado na pesquisa realizada por Hao, Yang e Jahng (2018)

| Parâmetro | Lodo |
|--|------------|
| Matéria Orgânica Dissolvida | |
| COD (mg.g ⁻¹) b.u. | 2,79±0,02 |
| COD (mg.g ⁻¹) b.s. | 18,96±0,11 |
| Polissacarídeos (mg.g ⁻¹) b.u. | 0,46±0,00 |
| Polissacarídeos (mg.g ⁻¹) b.s. | 3,16±0,00 |
| Proteína (mg.g ⁻¹) b.u. | 0,95±0,06 |
| Proteína (mg.g ⁻¹) b.s. | 6,49±0,44 |
| Elemento | |
| C (% mássica) b.s. | 38,55 |
| H (% mássica) b.s. | 5,85 |
| N (% mássica) b.s. | 6,01 |
| S (% mássica) b.s. | 1,00 |
| O (% mássica) b.s. | 24,65 |

Nota: b.u.: base úmida. b.s.: base seca. COD: carbono orgânico dissolvido.

Fonte: Hao, Yang e Jahng (2018).

O segundo componente utilizado na preparação da matriz inicial do processo de biossecagem é o *bulking agent*, que possui as funções de estruturar a matriz, aumentando a quantidade de poros; de ser fonte de nutrientes e matéria orgânica; e de adequar a umidade inicial da matriz. Diversos materiais podem ser utilizados como *bulking agents* dentre estes: serragem, cavaco de madeira, palha, lodo biosseco, lodo desaguado submetido à secagem natural, pó de café, cascas de arroz, dentre outros (HAO; YANG; JAHNG, 2018).

No Quadro 3.12 é apresentada a sistematização das características físico-químicas dos *bulking agents* utilizados nas pesquisas de biossecagem, a partir de 2010. Algumas pesquisas apresentam apenas o tipo de material utilizado, não especificando suas características. O teor de umidade dos *bulking agents* varia de 0,3 a 48,4%, o teor de sólidos voláteis varia de 66,92 a 99,3% e a densidade varia de 0,16 a 0,53 g.cm⁻³. Observa-se que o teor de umidade e a densidade dos *bulking agents* são menores do que os do lodo. Por outro lado, o teor de sólidos voláteis dos *bulking agents* é maior do que do lodo (85,2%).

Quadro 3.12 – Caracterização físico-química dos *bulking agents* utilizados nas pesquisas de biossecagem

(continua)

| Pesquisa | Tipo | Tamanho | U (%) b.u. | SV (%) b.s. | C/N | CT (%) | COT (%) b.s. | NT (%) b.s. | Valor calorífico (MJ.kg ⁻¹) b.s. | PCS (kJ.kg ⁻¹) | PCI (kJ.kg ⁻¹) | Densidade (g.cm ⁻³) | FAS (%) |
|---|--|----------------------|----------------|----------------|--------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|---|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------|
| Zhao et al. (2010) | Palha cortada | 2-3 mm (comprimento) | 8,91 ±0,453 | 89,5 ±0,002 | 39,4 ±3,225 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Serragem em pó | - | 7,70 ±0,310 | 97,0 ±0,061 | 9239 ±2,59 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Zhao et al. (2011a) | Palha de arroz cortada | 0,5-3 mm | 11,0 ±0,25 | 88,5 ±0,19 | - | - | 39,6 ±0,05 | 1,01 ±0,08 | 158 ±1,83 | - | - | - | - |
| | Serragem em pó | - | 9,01 ±0,31 | 96,2 ±0,21 | - | - | 47,7 ±0,01 | 0,514 ±0,002 | 179 ±0,99 | - | - | - | - |
| Cai et al. (2012) | Serragem | - | 20,6 ±0,45 | 98,3 ±0,18 | - | - | - | - | - | - | - | 0,19 ±0,01 | - |
| | Lodo biosseco | - | 40,8 ±0,66 | 73,9 ±0,39 | - | - | - | - | - | - | - | 0,49 ±0,01 | - |
| Cai et al. (2013) | Serragem | - | 20,6 ±0,5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Lodo biosseco | - | 40,8 ±0,7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Winkler et al. (2013) | Lodo seco previamente (após 1ª batelada) | Fração grosseira | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Lascas de madeira | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Villegas e Huiliñir (2014) e Huiliñir e Villegas (2015) | Aparas de madeira para U = 59% | 2,5 mm (diâmetro) | 9,43 ±0,78 | - | 208,15 gC.g ⁻¹ N | 54,12 ±0,66 | - | 0,26 ±0,02* | - | - | - | - | - |
| | Aparas de madeira para U = 68% | | 19,53 ±2,25 | - | 223,22 gC.g ⁻¹ N | 51,34 ±1,23 | - | 0,23 ±0,02* | - | - | - | - | - |
| | Aparas de madeira para U = 78% | | 11,92 ±1,45 | - | 206,15 gC.g ⁻¹ N | 53,60 ±0,56 | - | 0,26 ±0,03* | - | - | - | - | - |

Quadro 3.12 – Caracterização físico-química dos *bulking agents* utilizados nas pesquisas de biossecagem

(conclusão)

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------------------------|-----------------------|------------|-------------|---|---|---|---|---|------------|------------|------------|---|
| Lucatti et al. (2017) | Cavaco de madeira | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Wu et al. (2018) | Serragem | - | 10,1 | 96,2 | - | - | - | - | - | - | - | 0,16 | - |
| | Lodo biosseco | - | 48,4 | 76,0 | - | - | - | - | - | - | - | 0,53 | - |
| Hao, Yang e Jahng (2018) | <i>Air dried sludge</i> | 0,05-10 mm (diâmetro) | 9,75 ±0,08 | 76,17 ±0,07 | - | - | - | - | - | 17.434 ±58 | 15.513 ±52 | 0,52 ±0,01 | - |
| | Borra de café | 0,05-10 mm (diâmetro) | 3,40 ±0,01 | 97,98 ±0,01 | - | - | - | - | - | 22.843 ±37 | 21.988 ±36 | 0,43 ±0,01 | - |
| | Serragem | 0,05-10 mm (diâmetro) | 9,56 ±0,13 | 97,09 ±0,12 | - | - | - | - | - | 19.135 ±25 | 17.088 ±23 | 0,18 ±0,01 | - |
| Almeida et al. (2019) | Cavaco de madeira | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Ração | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Nota: U: umidade. SV: Sólidos Voláteis. CT: Carbono Total. COT: Carbono Orgânico Total. NT: Nitrogênio Total. PCS: Poder Calorífico Superior. PCI: Poder Calorífico Inferior. b.u.: base úmida. b.s.: base seca. *Air dried sludge*: lodo desaguado submetido à secagem natural. * Método do Nitrogênio Total Kjeldahl.

Para além dos parâmetros contidos no Quadro 3.12, Hao, Yang e Jahng (2018) caracterizam a matéria orgânica dissolvida e os elementos presentes nos *bulking agents*, conforme apresentado no Quadro 3.13.

Quadro 3.13 – Características da matéria orgânica dissolvida e dos elementos dos *bulking agents* utilizados na pesquisa realizada por Hao, Yang e Jahng (2018)

| Parâmetro | <i>Bulking agent</i> | | |
|--|-------------------------|---------------|-----------|
| | <i>Air dried sludge</i> | Borra de café | Serragem |
| Matéria Orgânica Dissolvida | | | |
| COD (mg.g ⁻¹) b.u. | 11,38±0,06 | 30,44±0,50 | 6,01±0,16 |
| COD (mg.g ⁻¹) b.s. | 12,60±0,07 | 31,52±0,52 | 6,64±0,18 |
| Polissacarídeos (mg.g ⁻¹) b.u. | 8,60±0,08 | 24,60±0,03 | 7,33±0,10 |
| Polissacarídeos (mg.g ⁻¹) b.s. | 9,53±0,08 | 25,47±0,03 | 8,10±0,12 |
| Proteína (mg.g ⁻¹) b.u. | 1,15±0,07 | 0,39±0,11 | 0,05±0,02 |
| Proteína (mg.g ⁻¹) b.s. | 1,27±0,07 | 0,40±0,11 | 0,06±0,03 |
| Elemento | | | |
| C (% mássica) b.s. | 36,14 | 51,62 | 47,72 |
| H (% mássica) b.s. | 5,42 | 7,12 | 6,15 |
| N (% mássica) b.s. | 6,15 | 2,05 | 0,15 |
| S (% mássica) b.s. | 1,05 | 0,33 | ND |
| O (% mássica) b.s. | 26,67 | 35,8 | 42,04 |

Nota: b.u.: base úmida. b.s.: base seca. ND: Não detectado. *Air dried sludge*: lodo desaguado submetido à secagem natural. COD: carbono orgânico dissolvido.

Fonte: Hao, Yang e Jahng (2018).

A matriz inicial da biossecagem é composta por lodo de ETE e *bulking agents*. No Quadro 3.14 é apresentada a sistematização da caracterização físico-química da matriz inicial utilizada nas pesquisas. Uma das principais características da matriz é a proporção de lodo e *bulking agents*, que pode ser indicada em relação à massa ou volume ou ainda pode ser apresentada em formato percentual.

O teor da umidade da matriz inicial variou de 23,8 a 81,8%. Contudo, as pesquisas realizadas por Huiliñir e Villegas (2015) e Yang, Zhang e Jahng (2014) tiveram como um dos objetivos avaliar a umidade inicial ótima. Desconsiderando os teores de umidade desses dois estudos, observa-se que umidade da matriz inicial variou de 59,1 a 78,2%, valores próximos à umidade ótima apresentada por Yang, Zhang e Jahng (2014), que varia de 50 e 70%, e por Huiliñir e Villegas (2015), 68%.

Em relação aos teores de sólidos voláteis, observa-se que para a matriz inicial estes variam de 52,7 a 95,52%. A densidade da matriz inicial de uma forma geral varia de 0,273 a 0,80 g.cm⁻³.

O FAS para a matriz inicial nas pesquisas variou de 50,4 a 69,7%. Segundo Yang, Zhang e Jahng (2014), a umidade inicial ótima é na faixa de 50 a 70%, pois garante um valor adequado de FAS na faixa de 56-60% e condições de água adequadas para as atividades dos microrganismos.

Quadro 3.14 – Caracterização físico-química da matriz inicial utilizada nas pesquisas de biossecagem

(continua)

| Pesquisa | Massa total (kg) | Proporção | U (%) b.u. | SV (%) b.s. | C/N | DQO (kg) | COT (kg) | NTK (kg) | Densidade g.cm ⁻³ | FAS (%) | pH | CE (mS.cm ⁻¹) |
|----------------------------|--|---|---|--|-----|----------|----------|----------|------------------------------|---------|----|---------------------------|
| Yang, Zhang e Jahng (2014) | Teste 1 a 8: 1,00 Teste 9: 7,00 Teste 10: 7,00 Teste 11: 5,00 Teste 12: 7,00 Teste 13: 7,00 | Teste 1 a 8: apenas lodo Teste 9: 2,88:1 m/m (lodo:air-dried sludge) Teste 10: 2,88:1 m/m (lodo:borracha) Teste 11: 17,33:1 m/m (lodo:serragem) Teste 12: 2,88:1 m/m (lodo:air-dried sludge) Teste 13: 2,88:1 m/m (lodo:lodo biosseco) | Teste 1: 81,8 Teste 2: 74,8 Teste 3: 70,7 Teste 4: 61,4 Teste 5: 55,3 Teste 6: 48,9 Teste 7: 38,1 Teste 8: 23,8 Teste 9: 68,0 Teste 10: 61,5 Teste 11: 78,2 Teste 12: 67,2 Teste 13: 69,7 | Teste 1: 71,6 Teste 2: 71,9 Teste 3: 71,8 Teste 4: 71,7 Teste 5: 72,2 Teste 6: 71,4 Teste 7: 71,2 Teste 8: 71,7 Teste 9: 77,6 Teste 10: - Teste 11: 86,5 Teste 12: 79,3 Teste 13: 73,7 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Cai, Gao e Hong (2015) | 1280 | 3:2:1 v/v (lodo:lodo biosseco:serragem) | 65,6 ±0,3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Zhang, J. et al. (2015) | - | 1:3 v/v (lodo:lodo biosseco) | 60 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Cai et al. (2016a) | 1280 | 3:2:1 v/v (lodo:lodo biosseco:serragem) | 66,1 | 73,75 | - | - | - | - | 0,80 | - | - | - |

Quadro 3.14 – Caracterização físico-química da matriz inicial utilizada nas pesquisas de biossecagem

(continua)

| Pesquisa | Massa total (kg) | Proporção | U (%) b.u. | SV (%) b.s. | C/N | DQO (kg) | COT (kg) | NTK (kg) | Densidade g.cm ⁻³ | FAS (%) | pH | CE (mS.cm ⁻¹) |
|--------------------------|---|--|---|---|-----|----------|----------|----------|--|---|--------------------------|----------------------------|
| Cai et al. (2016b) | - | 6:1:3 m/m (lodo:serragem:lodo biosseco) | 62,3 | 79,5 | - | - | - | - | 0,75 | - | - | - |
| Yu et al. (2017) | - | 1:0,62:0,28 m/m (lodo:lodo biosseco:casca de arroz) | 60 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Reis (2017) | Reator C, B1 e B2: 4 Reator A: 8,5 Reator B: 8,9 | Reator C, B1 e B2: 2:1 v/v (lodo:cavaco madeira) Reator A e B: 5:4 v/v ou 5,85:1 m/m (lodo:cavaco de madeira) | Reator C, B1 e B2: 59,1 Reator A e B: 60,0 | Reator C, B1 e B2: 88,8 Reator A e B: 61,4 | - | - | - | - | - | - | Reator A e B: 7,3 | Reator A e B: 0,137 |
| Lucatti et al. (2017) | Ensaio 1A: 3,63 Ensaio 1B: 7,26 Ensaio 2A: 4,60 Ensaio 2B: 11,43 Ensaio 3A: 4,25 Ensaio 3B: 4,37 | Ensaio 1A, 1B e 2A: 15% de cavaco de madeira em massa Ensaio 2B, 3A e 3B: 10% de cavaco de madeira em massa | Ensaio 1A: 68,2 Ensaio 1B: 69,8 Ensaio 2A: 64,6 Ensaio 2B: 67,3 Ensaio 3A e 3B: 53,4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Wu et al. (2018) | - | 6:3:1 m/m (lodo:lodo biosseco:serragem) | 66,3 | 87,5 | - | - | - | - | Teste V: 0,766±0,010 Teste C: 0,752±0,011 | - | 7,40 ±0,22 | 1,46 ±0,10 |
| Hao, Yang e Jahng (2018) | 10 | Teste A: 4:1 m/m (lodo:air-dried sludge) Teste B: 4:1 m/m (lodo:borra de café) Teste C: 4:1 m/m (lodo:serragem) | Teste A: 70,14 Teste B: 68,25 Teste C: 71,63 | Teste A: 75,11 Teste B: 90,11 Teste C: 88,58 | - | - | - | - | - | Valores apresentados no gráfico presente no artigo. | - | - |

Quadro 3.14 – Caracterização físico-química da matriz inicial utilizada nas pesquisas de biossecagem

(conclusão)

| Pesquisa | Massa total (kg) | Proporção | U (%) b.u. | SV (%) b.s. | C/N | DQO (kg) | COT (kg) | NTK (kg) | Densidade g.cm ⁻³ | FAS (%) | pH | CE (mS.cm ⁻¹) |
|-----------------------|--|--|--|--|-----|----------|----------|----------|------------------------------|---------|----|---------------------------|
| Almeida et al. (2019) | Ensaio 1: 4,3 Ensaio 2: 5,0 | 10%, em massa, de cavaco de madeira no 4º dia adicionou 10%, em massa, de ração. | Ensaio 1: 71,7 Ensaio 2: 65,8 | Ensaio 1: 61,9 Ensaio 2: 52,7 | - | - | - | - | - | - | - | - |

Nota: U: umidade. SV: Sólidos Voláteis. DQO: Demanda Química de Oxigênio. COT: Carbono Orgânico Total. NT: Nitrogênio Total. NTK: Nitrogênio Total Kjeldahl. m/m: proporção mássica. v/v: proporção volumétrica. NI: não informado. * Valores teóricos/calculados.

3.2.3.2. Procedimentos operacionais

Os procedimentos operacionais consistem na duração, no revolvimento da matriz e na aeração adotados no processo de biossecagem do lodo de ETE. No Quadro 3.15 é apresentada a sistematização dos procedimentos operacionais adotados nas pesquisas. Observa-se que a duração da biossecagem nas pesquisas variou de 8 a 24 dias.

O revolvimento atua na melhora das características da matriz para os microrganismos, auxiliando na biossecagem. O revolvimento possui três funções: 1) homogeneizar a matriz, reduzindo ou eliminando o gradiente de umidade e dessa forma disponibilizando água para os microrganismos de toda a matriz; 2) aumentar a quantidade de poros ocupado pelo ar na matriz, facilitando a passagem de ar, e; 3) expor a matéria orgânica não degradada (nutrientes) para os microrganismos, promovendo assim sua degradação. Assim, com as melhorias do meio, ocorre atividades de degradação aeróbia que fazem a temperatura aumentar, auxiliando na remoção de umidade da matriz (ZHAO et al., 2010; CAI; GAO; HONG, 2015).

O revolvimento pode ser realizado de forma mecânica ou manual e pode ocorrer em diferentes momentos da biossecagem, conforme apresentado no Quadro 3.15. O revolvimento mecânico ocorre principalmente em pesquisas em escala real e piloto e o revolvimento manual ocorre exclusivamente em escala laboratorial.

A aeração forçada possui a função de suprir a demanda de oxigênio dos microrganismos e remover a água, reduzindo a umidade da matriz. Existem três características que descrevem a aeração forçada: duração (contínua ou intermitente), regime (constante ou variável) e taxa, conforme é apresentado no item 3.2.2.1.1.

Quadro 3.15 – Informações dos procedimentos operacionais da biossecagem do lodo de ETE

(continua)

| Estudo | Escala | Duração biossecagem (dias) | Revolvimento | | Aeração | | |
|---|--------------|--|--|----------|---|-----------|--|
| | | | Período | Tipo | Duração | Regime | Taxa |
| Zhao et al. (2010) | Laboratorial | 20 | Teste 1 e 2: a cada 2 dias. Teste 3 e 4: a cada 4 dias. | Manual* | Intermitente Dias 0 a 8: 10 min de aeração 20 min pausa Dias 9 a 19: 10 min de aeração 50 min pausa | Constante | Teste 1 e 3: 0,0455 m ³ .h ⁻¹ .kg ⁻¹ b.u. Teste 2 e 4: 0,0909 m ³ .h ⁻¹ .kg ⁻¹ b.u. |
| Zhao et al. (2011a) | Laboratorial | 13 | A cada 2 dias | NI | Intermitente 10 min de aeração 20 min pausa | Constante | 0,084 m ³ .h ⁻¹ .kg ⁻¹ b.u. |
| Cai et al. (2012) | Laboratorial | 20 | Nos dias 9, 12, 15 e 18 | Mecânico | Intermitente | Variável | Taxa depende da temperatura da matriz e da taxa de consumo de O ₂ |
| Cai et al. (2013) | Laboratorial | 20 | Nos dias 9, 12, 15 e 18 | NI | Intermitente | Variável | Taxa depende da temperatura da matriz e da taxa de consumo de O ₂ . |
| Winkler et al. (2013) | Real | Batelada 1: 10 Batelada 2: 14 Total: 24 | NI | NI | Contínuo | NI | NI |
| Villegas e Huiliñir (2014) e Huiliñir e Villegas (2015) | Laboratorial | 8 | Nos dias 2, 3, 4, 5, 6 e 7 | Manual* | Contínuo | Constante | Teste 1, 4 e 7: 1 L.min ⁻¹ .kgST ⁻¹ Teste 2, 5 e 8: 2 L.min ⁻¹ .kgST ⁻¹ Teste 3, 6 e 9: 3 L.min ⁻¹ .kgST ⁻¹ |
| Yang, Zhang e Jahng (2014) | Laboratorial | Teste 1 a 8: 10 Teste 9 a 11: 12,9 Teste 12 e 13: 12,1. | Teste 1 a 8: no dia 6. Teste 9 a 11: no dia 5. Teste 12 e 13: no dia 7. | Manual | Contínuo | Constante | 0,035 m ³ .h ⁻¹ .kgST ⁻¹ |

Quadro 3.15 – Informações dos procedimentos operacionais da biossecagem do lodo de ETE

(continua)

| Estudo | Escala | Duração biossecagem (dias) | Revolvimento | | Aeração | | |
|-------------------------|--------------|---|---|----------|--------------|----------|---|
| | | | Período | Tipo | Duração | Regime | Taxa |
| Cai, Gao e Hong (2015) | Laboratorial | 20 | Teste 1: nos dias 3, 12, 15 e 18. Teste 2: nos dias 6, 12, 15 e 18. Teste 3: nos dias 9, 12, 15 e 18. | Mecânico | Intermitente | NI | NI |
| Zhang, J. et al. (2015) | Real | 21 | Uma vez por dia | Mecânico | Intermitente | Variável | NI |
| Cai et al. (2016a) | Laboratorial | 20 | Nos dias 9, 12, 15 e 18. | Mecânico | Intermitente | NI | NI |
| Cai et al. (2016b) | Piloto | 20 | Nos dias 9, 12, 15 e 18. | Mecânico | Intermitente | NI | NI |
| Yu et al (2017) | Real | Pilha 0: 22. Pilha 1: 22. Pilha 2: 14. | Pilha 0: uma vez por dia. Pilha 1: uma vez por dia. Pilha 2: duas vezes por dia na 1ª semana e uma na 2ª semana. | Mecânico | Intermitente | Variável | NI |
| Reis (2017) | Laboratorial | Reator C, B1 e B2: 14 Reator A e B: 20 | Reator C: não revolveu. Reator B1 e B2: nos dias 3, 5, 7, 9, 11, 13. Reator A e B: nos dias 6, 12, 15 e 18. | Manual | Contínuo | Variável | Reator C: depende taxa de consumo de O ₂ . Reator B1: até o 3º dia depende da taxa de consumo de O ₂ . Após 3º dia 2,6 L.min ⁻¹ . kgST ⁻¹ . Após 10º dia 6,4 L. min ⁻¹ . kgST ⁻¹ . Reator B2: até o 3º dia depende da taxa de consumo de O ₂ . Após 3º dia 2,6 L.min ⁻¹ . kgST ⁻¹ . Reator A: iniciou em 0,52 e depois aumentou para 0,54; 0,63; 0,65; e 0,75 L.min ⁻¹ .kgST ⁻¹ , no 6º, 12º, 15º e 18º dia, respectivamente. Reator B: iniciou em 0,49 e depois aumentou para 0,51; 0,61; 0,63; e 0,72 L.min ⁻¹ .kgST ⁻¹ no 6º, 12º, 15º e 18º dia, respectivamente. |

Quadro 3.15 – Informações dos procedimentos operacionais da biossecagem do lodo de ETE

(conclusão)

| Estudo | Escala | Duração biossecagem (dias) | Revolvimento | | Aeração | | |
|--------------------------|--------------|--|---|----------|--|---|---|
| | | | Período | Tipo | Duração | Regime | Taxa |
| Lucatti et al. (2017) | Laboratorial | Ensaio 1A e 1B: 10 Ensaio 2A, 2B, 3A e 3B: 20 | Ensaio 1A e 1B: nos dias 5 e 7. Ensaio 2A e 2B: nos dias 11 e 17. Ensaio 3A e 3B: nos dias 4, 8, 16. | Manual | Contínuo | Ensaio 1A, 1B, 2A e 2B: variável. Ensaio 3A e 3B: constante. | Ensaio 1A: iniciou em 0,87 e depois mudou para 1,30; 0,43; e 0,87 L.min ⁻¹ .kgST ⁻¹ , no 1º, 2º, e 5º dia, respectivamente. Ensaio 1B: iniciou em 0,69 e depois mudou para 1,15; 1,37; 0,46 e 0,69 L.min ⁻¹ .kgST ⁻¹ , no 2º, 3º, 5º e 7º dia, respectivamente. Ensaio 2A: iniciou em 0,92 e depois mudou para 1,37 e 1,84 L.min ⁻¹ .kgST ⁻¹ , no 11º e 17º dia, respectivamente. Ensaio 2B: iniciou em 0,40 e depois mudou para 0,54 e 0,57 L.min ⁻¹ .kgST ⁻¹ , no 11º e 17º dia, respectivamente. Ensaio 3A e 3B: 1,0 L.min ⁻¹ . kgST ⁻¹ |
| Wu et al. (2018) | Piloto | 20 | Nos dias 9, 12, 15 e 18. | Mecânico | 10 min de aeração 30 min pausa em ambos os testes | Teste C: Constante Teste V: variável | Teste C: 46 m ³ .d ⁻¹ . ton matriz ⁻¹ Teste V: valores apresentados em forma de gráfico; |
| Hao, Yang e Jahng (2018) | Laboratorial | 16 | A cada 4 dias. | Manual | Contínuo | Constante | 4 L.min ⁻¹ .kgST ⁻¹ (0,075 m ³ .h ⁻¹ .kgST ⁻¹) |
| Almeida et al. (2019) | Laboratorial | 20 | A cada 4 dias. | Manual | Contínuo | Constante | Ensaio 1: 1,0 L.min ⁻¹ .kgST ⁻¹ Ensaio 2: 2,0 L.min ⁻¹ .kgST ⁻¹ |

Nota: NI: não informado. * Reis et al. (2019).

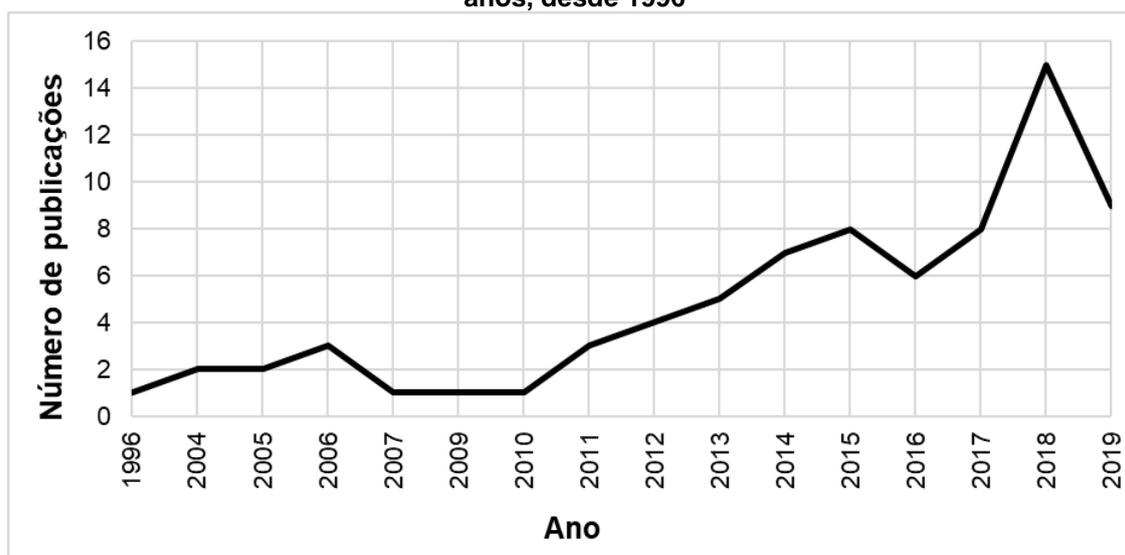
3.3. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A análise bibliométrica consiste na avaliação quantitativa das publicações científicas em uma determinada área, de forma complementar a revisão bibliográfica, permitindo a análise de tendências e da evolução histórica e a identificação de temas para novas pesquisas, das lacunas existentes e dos principais autores da área pesquisada (SOARES et al., 2016; ZUPIC; ČATER, 2015).

Nesse contexto, foi realizada a análise bibliométrica para a biossecagem de lodo de ETE, conforme metodologia apresentada no item 4.1. A partir do resultado da busca realizada, que retornou 76 publicações indexadas na base de dados Scopus no período entre 1996 e 2019, e dos indicadores bibliométricos foi possível mensurar a produção científica desse campo de pesquisa por meio de três parâmetros principais: evolução histórica da pesquisa, publicações por países e rede de colaboração entre os países.

A evolução histórica foi obtida com base no número de publicações por ano, conforme é apresentado na Figura 3.14. Observa-se que há um aumento no número publicações sobre biossecagem do lodo de ETE, sendo que em 2018 verifica-se a maior quantidade, representando 20% do total de publicações. No período de cinco anos (2015 a 2019), observa-se a publicação de 61% dos trabalhos referentes à biossecagem do lodo de ETE. Tal fato pode estar relacionado à preocupação em relação à necessidade de obtenção de novos recursos por meio da reutilização e reciclagem de resíduos, e à necessidade de destinação ambientalmente adequada dos lodos gerados nas ETEs.

Figura 3.14 – Evolução do número de publicações sobre biossecagem de lodo de esgoto em 24 anos, desde 1996

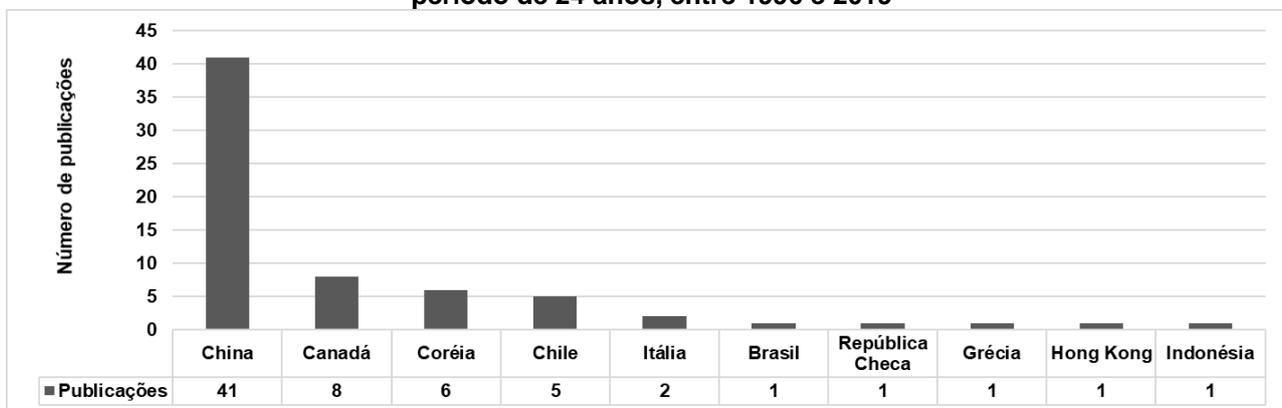


Fonte: autor (2020).

Na Figura 3.15 é apresentado o *ranking* dos 10 países que mais publicaram sobre biossecagem de lodo de ETE desde 1996, sendo responsáveis por 88% do total de

publicações nessa área. A China é o país que mais publicou, apresentando 41 trabalhos, os quais representam 54% do total de publicações. Os dois países da América Latina presentes no *ranking* são o Chile na 4ª posição com um total de 5 publicações (7% do total de publicações) e o Brasil na 6ª posição com 1 publicação (1% do total de publicações). Cabe ressaltar que outros 9 países (República Checa, Grécia, Hong Kong, Indonésia, Holanda, Polônia, Espanha, Turquia e EUA) publicaram apenas 1 artigo ocupando a mesma posição que o Brasil. O artigo elaborado por Reis et al. (2019) é o primeiro artigo brasileiro publicado em âmbito internacional e o primeiro que realiza uma revisão sobre o tema.

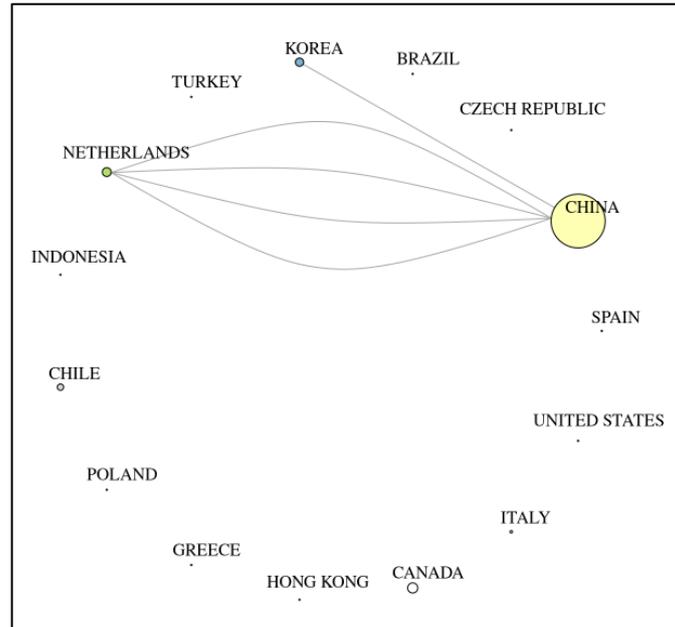
Figura 3.15 – *Ranking* dos 10 países que mais publicam sobre biossecagem de lodo de ETE no período de 24 anos, entre 1996 e 2019



Fonte: autor (2020).

Na Figura 3.16 é apresentada a rede de colaborações entre países nas publicações sobre biossecagem do lodo de ETE. Observa-se que ocorrem apenas cinco colaborações, quatro entre a China e a Holanda e a outra entre a China e a Coreia.

Figura 3.16 – Rede de colaboração entre países nas publicações sobre biossecagem do lodo de ETE desde 1996



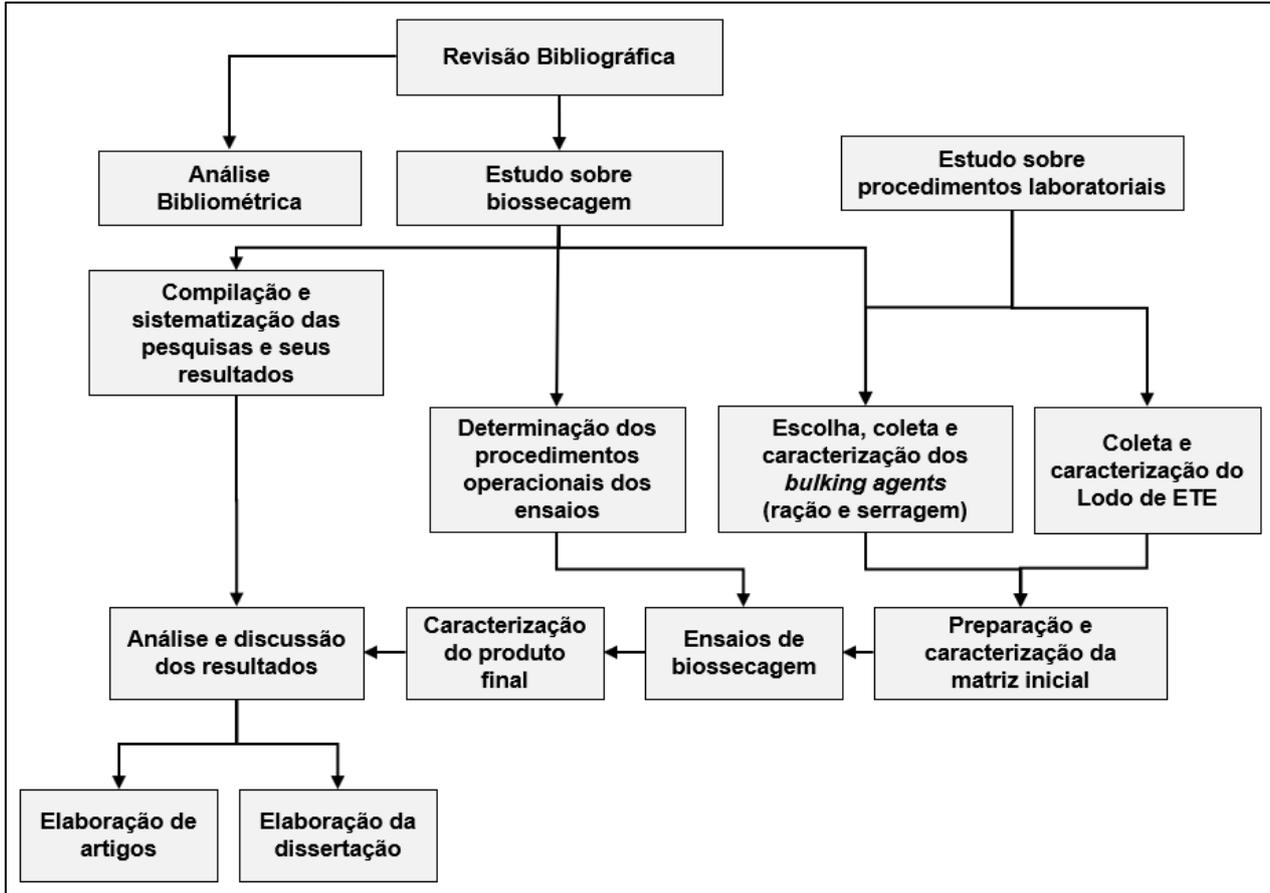
Fonte: autor (2020).

A análise dos resultados obtidos evidencia as oportunidades de estudos e pesquisas na área de biossecagem do lodo de ETE, devido ao aumento no número de publicações nessa área e à necessidade de destinar de forma ambientalmente adequada o lodo gerado na ETE, contribuindo para a justificativa do presente trabalho.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do trabalho consistiu no levantamento bibliográfico, na análise bibliométrica e na realização de ensaios de biossecagem. Na Figura 4.1 é apresentada o fluxograma das etapas desta pesquisa.

Figura 4.1 – Fluxograma das etapas desta pesquisa



Fonte: autor (2020).

4.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Durante a pesquisa foi realizada a análise bibliométrica, que permitiu a obtenção da evolução histórica das principais pesquisas realizadas nos último 24 anos, a partir de 1996, das publicações por países e da rede de colaboração entre os países, auxiliando na compreensão da relevância do tema estudado.

A análise bibliométrica foi realizada utilizando a mesma sentença de busca por título, *abstract* e palavras chaves na base de dados SCOPUS:

((biodrying AND sludge AND (sewage OR wastewater)) OR ("bio-drying" AND sludge AND (sewage OR wastewater))) OR ("biodried" AND sludge AND (sewage OR wastewater))

Posteriormente, foi exportado o arquivo em formato “.bib”, contendo os resultados dessas pesquisas. O *upload* desse arquivo foi realizado na plataforma de Análise Bibliométrica, elaborada por Cavalca (2019), que gera o relatório da análise utilizando a linguagem “R” e o pacote *Bibliometrix*.

A revisão bibliográfica teve como literatura base os artigos resultantes da pesquisa no site *SCOPUS* e foi complementada por pesquisas nacionais, sendo uma tese de doutorado e dois artigos de congressos nacionais. A revisão foi realizada principalmente no início da pesquisa e se estendendo ao longo do trabalho, permitindo o aprofundamento sobre o lodo de ETE e os processos de biossecagem e suas variáveis, através da elaboração de diagramas de encandeamento lógico.

Concomitantemente, foi realizada a sistematização e compilação dos resultados das pesquisas presentes na literatura. Esse processo teve como objetivo complementar a tabela “compilação de dados de ensaios de biossecagem para lodo de esgoto dos artigos existentes” elaborada por Reis (2017) em sua tese de doutorado e avançar na sistematização sobre o tema e na compreensão dos processos e da operação da biossecagem do lodo de ETE.

4.2. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA MATRIZ INICIAL DOS ENSAIOS DE BIOSSECAGEM

A matriz inicial dos ensaios de biossecagem foram compostas por diferentes proporções de lodo de esgoto e *bulking agents* (serragem e ração), conforme é apresentado no item 4.4.

Foram realizadas duas campanhas de coleta de lodo desaguado na ETE localizada no interior do Estado de São Paulo. Essa ETE trata uma vazão média de 457 L.s⁻¹ e gera cerca de 45 ton.dia⁻¹ de lodo desaguado, com aproximadamente 23% de Sólidos Totais (ST), que equivale a 77% de umidade. Esta estação possui tratamento anaeróbio por reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) seguido de processo físico-químico, conforme diagrama apresentado na Figura 4.3.

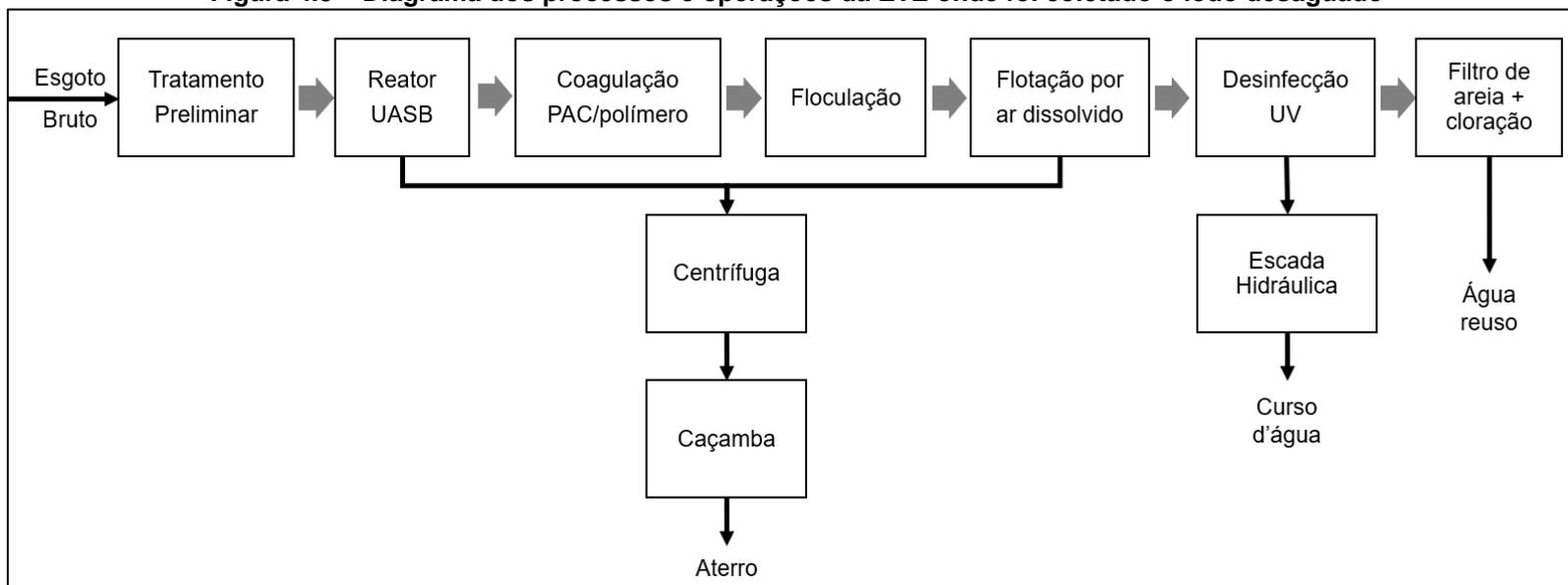
O lodo desaguado foi coletado na caçamba da ETE, após o sistema de desaguamento mecânico (centrífuga) com aplicação prévia de polímero, para favorecer o desaguamento na ETE. O lodo desaguado utilizado nos ensaios é apresentado na Figura 4.2. O lodo da campanha 1 e 2 foi utilizado nos ensaios 1 e 2; 7 e 8, respectivamente.

Figura 4.2 – Lodo desaguado utilizado nos ensaios de biossecagem, coletado na caçamba da ETE



Fonte: autor (2020).

Figura 4.3 – Diagrama dos processos e operações da ETE onde foi coletado o lodo desaguado



Fonte: autor (2020).

A serragem foi coletada em uma serralheria localizada em uma cidade do interior do Estado de São Paulo. A serragem foi peneirada utilizando peneiras com aberturas de 2,00 mm e 9,52 mm e plataforma agitadora durante 3 minutos, conforme apresentado na Figura 4.4. A serragem utilizada nos ensaios (Figura 4.5) consistiu na porção retida na peneira de abertura de 2 mm.

Figura 4.4 – Equipamentos utilizados para peneirar a serragem



Fonte: autor (2020).

Figura 4.5 – Serragem utilizada nos ensaios de biossecagem



Fonte: autor (2020).

A ração utilizada na pesquisa (Figura 4.6) foi ração de coelho adquirida em uma casa agropecuária em uma cidade do interior do estado de São Paulo. Ressalta-se que a ração foi utilizada como fonte de nutrientes, com o objetivo de propiciar o entendimento do processo da biossecagem e das funções dos *bulking agents*.

A ração utilizada possui a seguinte composição básica: B.H.T. (Hidróxido de tolueno butilado); Calcáreo Calcítico, Cloreto de Sódio (Sal Comum), Farelo de Arroz; Farelo de Gluten de Milho 21; Farelo de Soja; Farelo de Trigo; Feno de Gramíneas; Fosfato Bicalcico; Iodato de Calcio; Levedura Inativada; Lisina Metionina; Milho Integral Moído; Óleo de Soja degomado; Pantotenato de Cálcio; Robenidina; Sulfato de Cobalto; Sulfato de Cobre; Sulfato de Ferro; Sulfato de Mangânes; Sulfato de Zinco; Vitamina A; Vitamina B1; Vitamina B12; Vitamina B2; Vitamina B6; Vitamina D3; Vitamina E; Vitamina K3.

É importante salientar que em outras pesquisas e/ou na implantação da biossecagem em escala real, a ração pode ser substituída por outro *bulking agent*, como palha, serragem, resíduos domiciliares, etc.

Figura 4.6 – Ração utilizada nos ensaios de biossecagem



Fonte: autor (2020).

A caracterização do lodo, da serragem e da ração é apresentada nos resultados (item 5.2).

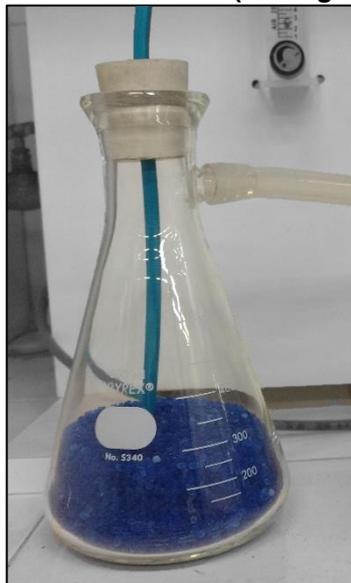
4.3. EQUIPAMENTO LABORATORIAL DO SISTEMA DE BIOSSECAGEM

O sistema de biossecagem utilizado por Reis (2017) foi reestruturado e adequado para esta pesquisa, tendo como objetivo melhorar o processo de biossecagem e o composto gerado. Para tanto, foi adicionado um desumidificador de ar (sílica gel azul 2 a 4 mm) para reduzir a umidade do ar de entrada, aumentando assim a capacidade deste reter umidade ao passar pela matriz. O kitassato foi parcialmente preenchido

(aproximadamente 300 mL) com sílica gel e instalado antes do rotâmetro (Figura 4.7) para que não ocorresse alteração na vazão de aeração. O ar proveniente do compressor entra no kitassato pelo tubo azul que atravessa uma rosca na parte superior da vidraria até atingir o fundo onde o ar passa obrigatoriamente pela sílica gel e posteriormente sai pela tubulação transparente na lateral do kitassato e passa pelo rotâmetro. Após a realização do ensaio, a sílica gel foi seca na estufa por 24 horas e então utilizada no ensaio seguinte.

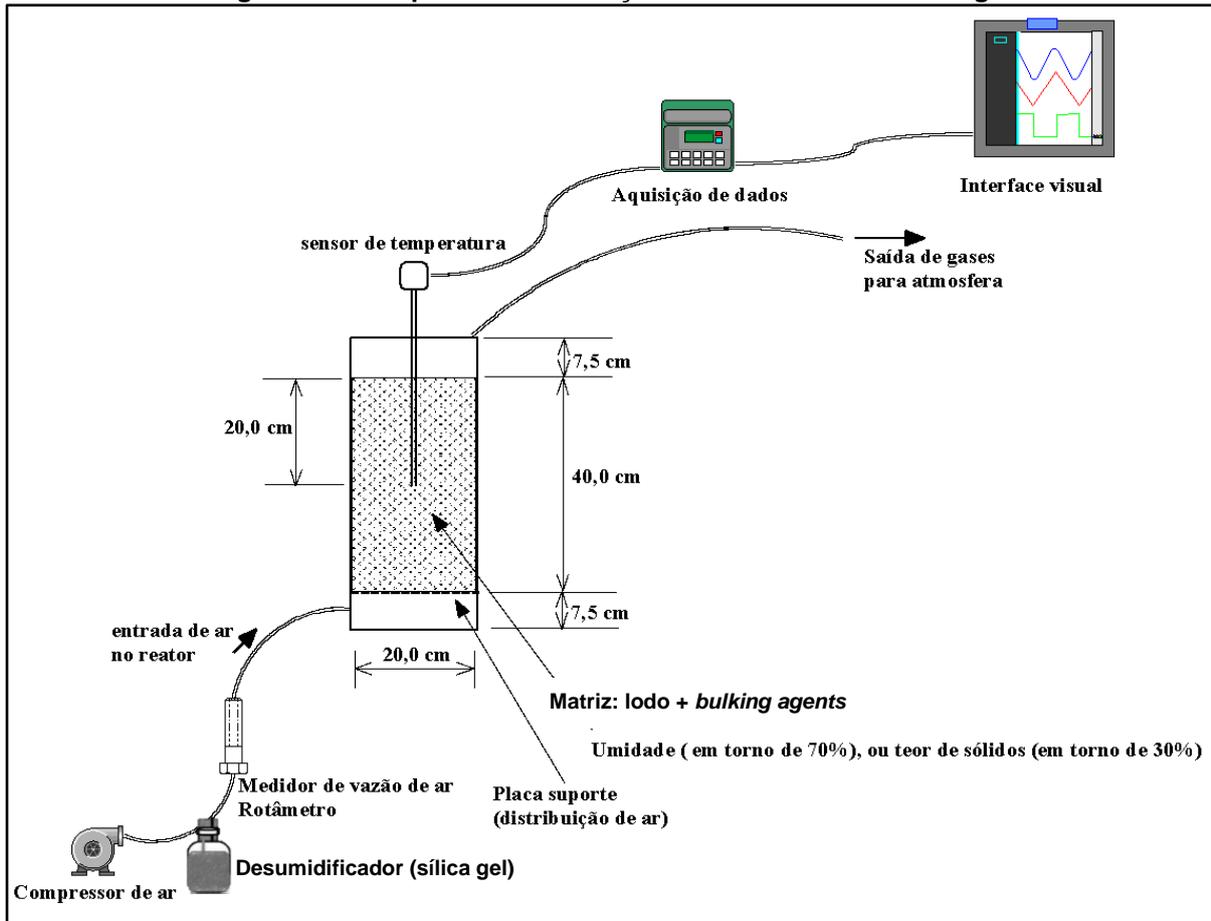
Os ensaios de biossecagem dessa pesquisa foram realizados no sistema reestruturado instalado no laboratório de Saneamento do Departamento de Engenharia Civil (DECiv), da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), conforme esquema apresentado na Figura 4.8. O sistema possui compressor e desumidificador de ar e rotâmetro para controle da vazão de aeração. Além disso, o sistema possui reator de chapa de inox com isolamento térmico nas paredes, fundo e tampa em material refratário (Figura 4.9), objetivando evitar a perda de temperatura para o ambiente. O reator possui pontos para entrada de ar, saída de ar e conexão do sensor de temperatura (Figura 4.9). As dimensões do reator são apresentadas na Figura 4.8. O sistema dispõe de sistema de medição de temperatura e aquisição e armazenamento de dados.

Figura 4.7 – Desumidificador do ar de entrada (sílica gel) do sistema de biossecagem



Fonte: autor (2020).

Figura 4.8 – Esquema da instalação do sistema de biossecagem



Fonte: adaptado de Lucatti et al. (2017).

Figura 4.9 – Reator utilizado no sistema de biossecagem, com detalhe da parte superior (tampa) dos pontos para entrada e saída de ar e conexão do sensor de temperatura no centro

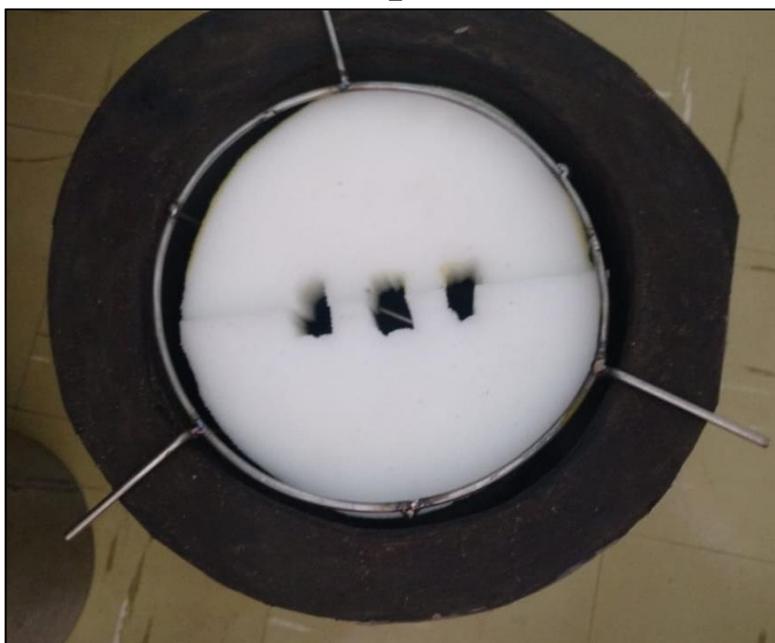


Fonte: Reis (2017).

Conforme apresentado por Reis (2017), durante os ensaios, parte do vapor d'água condensava na tampa do reator, influenciando a umidade da matriz e o processo de

biossecagem. Nesse sentido, apenas para os Ensaios 1 e 2 foi adicionado uma esponja de 6 cm de altura na parte superior do reator (Figura 4.10), com uma cesta suporte de inox, para absorção do vapor d'água formado durante o processo da biossecagem. Essa estrutura com a esponja não foi utilizada para o restante dos ensaios (Ensaio 3 a 8), pois não se notou melhoria significativa nos resultados.

Figura 4.10 – Esponja na parte superior do reator do sistema de biossecagem usada nos Ensaio 1 e 2



Fonte: autor (2020).

4.4. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS DE BIOSSECAGEM

Foram realizados ao todo oito ensaios durante esta pesquisa. No Quadro 4.1 são apresentadas as informações de proporção mássica da matriz inicial, taxa de aeração, umidade da matriz inicial, revolvimento e duração para cada ensaio.

Após a realização dos Ensaio 1 e 2, observou-se que a temperatura da matriz não subiu conforme esperado no processo de biossecagem. Assim, realizou-se os ensaios 3, 4, 5 e 6 sem lodo para entendimento do processo, reprodução de resultados mais próximo aos reportados pela literatura e calibração dos equipamentos e dos procedimentos de biossecagem.

O revolvimento foi realizado retirando toda a matriz do reator, colocando-a em um recipiente e misturando de forma manual até atingir a homogeneização.

Quadro 4.1 – Proporção mássica da matriz inicial, taxa de aeração, umidade da matriz inicial, revolvimento e duração para cada ensaio de biossecagem realizado

| Ensaio | | Proporção mássica da matriz inicial ¹ | Taxa de aeração* | Umidade matriz inicial (%) | Revolvimento | Duração (dias) |
|--------|----------------|--|---|----------------------------|---|----------------|
| 1 | Série | 6:1:2 | 1,0 | 68 | A cada 4 dias | 20 |
| 2 | com lodo | 6:1:3 | 1,0 | 68 | A cada 4 dias | 20 |
| 3 | Série sem lodo | 0:1:8 | Variável (1,0 até o 20° dia; 3,0 do 20° ao 22° dia, e; 4,0 do 22° ao 24° dia) | 68 | De acordo com a evolução da temperatura | 24 |
| 4 | | 0:1:8 | Variável (2,0 até o 20° dia; 3,0 do 20° ao 22° dia, e; 4,0 do 22° ao 24° dia) | 68 | | 24 |
| 5 | | 0:1:8 | 2,0 | 60 | | 16 |
| 6 | | 0:1:8 | 3,0 | 68 | | 16 |
| 7 | | Série | 6:1:3 | 2,0 | | 60 |
| 8 | com lodo | 6:1:5 | 2,0 | 60 | 20 | |

Nota: ¹ (lodo:serragem:ração) em b.u.: base úmida. * taxa de aeração em L.min⁻¹.kgST⁻¹.

As matrizes utilizadas nos ensaios foram preparadas utilizando diferentes proporções mássicas de lodo desaguado e *bulking agents* (serragem e ração), conforme apresentado no Quadro 4.1. Após a preparação da matriz foi adicionada água destilada para atingir a umidade inicial preestabelecida. O peso final da matriz inicial de cada ensaio foi de 6 kg. A quantidade de água adicionada foi calculada por meio das Equações 4.1 e 4.2.

$$\text{Água a ser adicionada} = \left[\frac{U_{desejada} * M_{total} - (U_{teórica\ matriz} * M_{total})}{1 - \frac{U_{desejada}}{100}} \right] \quad (4.1)$$

Sendo:

Água a ser adicionada: quantidade de água destilada a ser adicionada na matriz (kg).

$U_{desejada}$: umidade da matriz inicial desejada (%).

$U_{teórica\ matriz}$: umidade calculada da matriz inicial sem adição de água (%);

M_{total} : massa total da matriz (kg).

$$U_{teórica\ matriz} = \left[\frac{\left(\frac{U_{lodo} * M_{lodo}}{100} \right) + \left(\frac{U_{serragem} * M_{serragem}}{100} \right) + \left(\frac{U_{ração} * M_{ração}}{100} \right)}{M_{total}} \right] \quad (4.2)$$

Sendo:

U_{lodo} : umidade do lodo (%);

M_{lodo} : massa do lodo (%);

U_{serragem} : umidade da serragem (%);

M_{serragem} : massa da serragem (%);

$U_{\text{ração}}$: umidade da ração (%);

$M_{\text{ração}}$: massa da ração (%).

A taxa de aeração, em termos de quilos de sólidos secos da matriz inicial ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ por kg de ST) foi fixada para os Ensaios 1, 2, 5, 6, 7 e 8, conforme apresentado no Quadro 4.1. A taxa de aeração do Ensaio 3 foi de $1,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$ no início até o 20º dia, foi aumentada para $3,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$ até o 22º dia e novamente aumentada para $4,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$ até o último dia de ensaio (24º dia). A taxa de aeração do Ensaio 4 foi de $2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$ no início até o 20º dia, foi aumentada para $3,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$ até o 22º dia e novamente aumentada para $4,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$ até o último dia de ensaio (24º dia).

A vazão de aeração, em $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, foi calculada para regular o rotâmetro. O cálculo foi realizado com base na determinação de ST da matriz inicial, conforme é apresentado nas Equações 4.3 e 4.4.

$$M_{ST \text{ matriz}} = \left(\frac{ST_{\text{matriz}}}{100} \right) * M_{\text{matriz}} \quad (4.3)$$

Sendo:

$M_{ST \text{ matriz}}$: massa de sólidos seco na matriz (kg).

ST_{matriz} : teor de sólidos totais da matriz (%).

M_{matriz} : massa da amostra da matriz (kg).

$$Q_{ar} = TA * M_{ST \text{ matriz}} \quad (4.4)$$

Sendo:

$Q_{ar \text{ rot}}$: vazão de aeração no rotâmetro ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$).

TA: taxa de aeração ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$).

No Quadro 4.2 são apresentados os parâmetros analisados para a caracterização de cada um dos componentes iniciais (lodo, serragem e ração) utilizados na preparação da matriz inicial do processo de biossecagem, assim como o método de medição utilizado. Cada análise foi realizada em triplicata e os resultados são apresentados no item 5.

Para a medição do pH da serragem e da ração foi necessário adaptar as instruções da norma para solos, adicionando 100 mL de água destilada ao invés de 25 mL, pois esses dois materiais absorvem água, não sendo possível gerar uma quantidade suficiente de líquido para medir o pH.

Quadro 4.2 – Parâmetros analisados para a caracterização do lodo, da serragem e da ração

| Parâmetro | Forma de medição |
|-----------------------|--|
| Umidade (U) | Método J – Resíduos Totais (Sólidos Totais) – NBR 10.644/1989. |
| Sólidos Totais (ST) | Método J – Resíduos Totais (Sólidos Totais) – NBR 10.644/1989. |
| Sólidos Voláteis (SV) | Método M – Resíduos Voláteis (Sólidos Voláteis) – NBR 1.0644/1989. |
| pH | Soluções aquosas - Determinação do pH com eletrodos de vidro - NBR 7.353/2014 e Manual de métodos de análise de solo (TEIXEIRA, 2017). |
| Densidade | Pesagem – balança/Volume. Manual de métodos de análise de solo (TEIXEIRA, 2017). |

Durante todo o período dos ensaios, a temperatura no interior dos reatores foi monitorada automaticamente, por um sensor programado para realizar a medição a cada 2 minutos, a fim de avaliar suas variações e oscilações ao longo do processo de biossecagem. A temperatura ambiente foi medida no início e no final de cada ensaio, e nos dias que ocorreram o revolvimento da matriz do reator.

Para Zhao et al. (2010) a temperatura da fase termofílica é na faixa de 45-55°C, para Cai, Gao e Hong (2015) é superior a 55°C e para Cai et al. (2016a; 2016b; 2017; 2018a; 2018b) e Wu et al. (2018) é superior a 50°C. Portanto, adotou-se como temperatura da fase termofílica temperaturas superiores a 50°C.

Para a análise dos parâmetros físico-químicos da matriz de cada ensaio, ao longo do processo de biossecagem (Quadro 4.3), foram coletadas amostras em triplicata no início, durante o revolvimento da matriz e no final de cada ensaio. A determinação de ST, U, SV, pH e densidade foi realizada após o revolvimento da matriz. Além disso, foi realizado ao longo de todos os ensaios o registro fotográfico.

Os resultados dos ensaios foram analisados, discutidos e comparados entre si e com a literatura.

Outras duas formas de análise dos resultados foram a quantificação de espaços de ar (*Free Air Space* - FAS) e o índice de biossecagem (*Biodrying Index* – BI) (ZHAO et al., 2011a; YANG, ZHANG E JAHNG, 2014; HAO; YANG; JAHNG, 2018). As fórmulas de cálculo do FAS e do BI são apresentadas nas equações 3.2 e 3.1, respectivamente.

Para o cálculo do FAS, adotou-se:

- d_{H_2O} : 997 kg.m⁻³;

- d_{sv} : 2500 kg.m⁻³ (RICHARD⁸, 2004 apud YANG, ZHANG E JAHNG, 2014);
- d_{inor} : 1600 kg.m⁻³ (RICHARD, 2004 apud YANG, ZHANG E JAHNG, 2014).

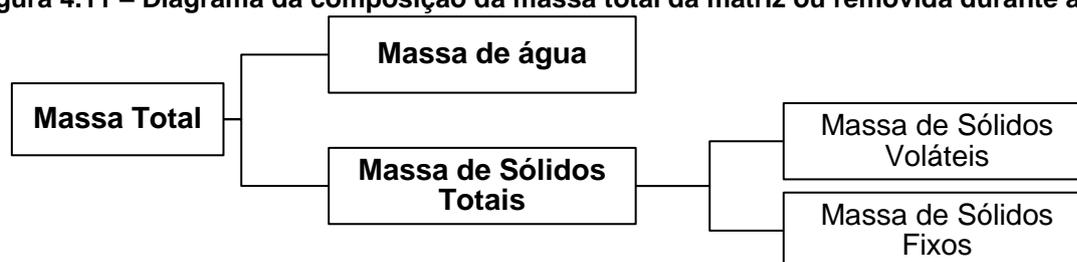
Quadro 4.3 – Parâmetros físico-químicos analisados para a caracterização da matriz de cada ensaio ao longo do processo de biossecagem

| Parâmetro | Forma de medição |
|--------------------------------------|--|
| Umidade (U) | Método J – Resíduos Totais (Sólidos Totais) – NBR 10.644/1989. |
| Sólidos Totais (ST) | Método J – Resíduos Totais (Sólidos Totais) – NBR 10.644/1989. |
| Sólidos Voláteis (SV) | Método M – Resíduos Voláteis (Sólidos Voláteis) – NBR 1.0644/1989. |
| pH | Soluções aquosas - Determinação do pH com eletrodos de vidro - NBR 7.353/2014 e Manual de métodos de análise de solo (TEIXEIRA, 2017). |
| Densidade | Pesagem – balança/Volume. Manual de métodos de análise de solo (TEIXEIRA, 2017). |
| Altura da camada da matriz no reator | Manual – régua/trena |
| Volume da mistura | Manual: Área da base x altura |
| Massa da mistura | Pesagem - balança |

4.5. BALANÇO DE MASSA

O balanço de massa dos ensaios de biossecagem consiste na quantificação da massa de água, de ST, de SV e de SF presentes na matriz e que foram removidas e/ou consumidas ao longo do processo de biossecagem. A massa total em ambos os casos é composta por água, ST, SV e SF, conforme diagrama apresentado na Figura 4.11.

Figura 4.11 – Diagrama da composição da massa total da matriz ou removida durante a biossecagem



Fonte: autor (2020).

A massa total foi obtida pesando a matriz no início, nos revolvimentos e no final do ensaio. A massa de água, de ST, de SV e de SF, em kg, da matriz foi calculada por meio da multiplicação da massa total e dos teores de U, ST, SV e SF.

⁸ RICHARD, T. L., VEEKEN, A. H. M., WILDE, V. D. HAMELERS, H. V. M. *Air filled porosity and permeability relationships during solid-state fermentation. Biotechnology Progress.* v.101(10), p.3379-3387, 2004.

A massa total, de água, de ST, de SV e de SF, em kg, removida ou consumida durante a biossecagem foi calculada pela diferença desses parâmetros na matriz em um determinado tempo (t) e na matriz no tempo anterior (t-1).

Os valores obtidos desses parâmetros foram ajustados para que a massa que foi retirada para a realização de análises e a massa removida durante o revolvimento não interferisse nos resultados, o que poderia levar à superestimação da redução mássica, por exemplo.

4.6. REMOÇÃO DE UMIDADE E TROCA DE CALOR

Para a quantificação da remoção de umidade foi realizado o cálculo da água gerada pelo metabolismo microbiano (Equação 3.4). Para esse cálculo foi adotado:

- $Y_{H_2O/SV}$: 0,41 $g_{H_2O}.g^{-1}SV_{consumido}$, conforme apresentado por Zhang et al. (2012) apud Huiliñir e Villegas (2015).

E para a quantificação das trocas de calor foi calculado a energia biológica (Equação 3.11), o calor sensível consumido pela água (Equação 3.17) e o calor sensível consumido pelos sólidos secos da matriz (Equação 3.18). Para esses cálculos foi adotado os seguintes valores, conforme apresentado por Zhao et al. (2010):

- H_c : 21.000 $kJ.kg^{-1}$;
- $C_{água}$: 4,184 $kJ.kg^{-1}.°C^{-1}$;
- $C_{sólido}$: 1,046 $kJ.kg^{-1}.°C^{-1}$.

Além disso, para calcular a quantidade de água e de sólidos na matriz em um determinado tempo foi gerado um gráfico com linha de tendência linear para cada trecho, isto é, entre o início do ensaio e o primeiro revolvimento, entre o primeiro e o segundo revolvimento, e assim sucessivamente até o final do ensaio. Dessa forma, obteve-se as equações de cada trecho de um mesmo ensaio. Esse procedimento foi realizado para todos os ensaios e é apresentado no Apêndice A.

4.7. PODER CALORÍFICO

A medição do poder calorífico foi realizada para as seguintes amostras, sendo “D” referente ao dia do ensaio:

- lodo da segunda campanha de coleta de amostras (campanha 2);
- produto biosseco (matriz D20) do Ensaio 7;

- matriz inicial (matriz D0) do Ensaio 8 (sem adição de água destilada), e;
- produto biosseco (matriz D20) do Ensaio 8.

Essas amostras foram enviadas para um laboratório externo, que mediu:

- Poder Calorífico Inferior (PCI) e Poder Calorífico Superior (PCS) base úmida em kcal.kg^{-1} ;
- Poder Calorífico Inferior (Base seca) e Poder Calorífico Superior (Base seca) em kcal.kg^{-1} ;
- Porcentagem de Sólidos em % p.p⁻¹.

O Limite de Quantificação (LQ) ou Faixa de Trabalho (Faixa) é definido como a menor concentração do composto/substância que pode ser determinada com um nível aceitável de exatidão e precisão, sendo que esse valor para o PCI e PCS base úmida, PCI e PCS base seca e para a porcentagem de sólidos é, respectivamente, 150, 384 e 0,05.

Ademais, os resultados fornecidos pelo laboratório apresentaram os valores da Incerteza (I) que equivale a incerteza expandida (U), que é baseada na incerteza padrão combinada, com um nível de confiança de 95% ($k=2$).

O fator de conversão utilizado foi de 1 kcal corresponde a 4,184 kJ, ou, 1 kJ equivale a 0,239 kcal.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. SISTEMATIZAÇÃO DAS PESQUISAS DE BIOSSECAGEM DO LODO DE ETE DESCRITOS NA LITERATURA

Ao analisar as pesquisas sobre a biossecagem do lodo de ETE, observou-se que a maioria das pesquisas existentes são apresentadas no formato de artigos em periódicos científicos, sendo importante para a divulgação do conhecimento, contudo a abordagem desses artigos é específica, isto é, apresentam apenas um fragmento de análise do processo de biossecagem, não apresentando de forma integrada todos os fatores que influenciam o processo.

O artigo elaborado por Reis et al. (2019) é o primeiro em âmbito internacional que apresenta uma revisão sobre a biossecagem do lodo de esgoto. Os autores constataram que não há uma padronização dos materiais utilizados, dos procedimentos e das variáveis monitoradas durante os ensaios de biossecagem. Ainda segundo os autores, a padronização permitiria e facilitaria a comparação dos resultados, a compilação de dados e a evolução do monitoramento e do conhecimento do processo.

É importante ressaltar que, ao analisar o Quadro 3.9 e o Quadro 3.10, pode-se observar a falta de informações referentes à origem e caracterização do lodo, dificultando a análise e comparação dos resultados da biossecagem. Essa mesma constatação ocorre ao analisar o Quadro 3.12, referente às características dos *bulking agents* utilizados na biossecagem.

Nesse sentido, o item 3.1.2 (Revisão Bibliográfica – Biossecagem) foi elaborado com o objetivo de apresentar e analisar as formas de avaliação do processo; os diversos fatores que influenciam os processos biológico e físico, e; o desenvolvimento e operação da biossecagem do lodo de ETE. A partir disso, foi possível observar que é necessário compreender e avaliar o efeito combinado dos diversos fatores que influenciam a biossecagem do lodo de esgoto.

5.2. PREPARAÇÃO DA MATRIZ INICIAL DOS ENSAIOS DE BIOSSECAGEM

As matrizes dos ensaios foram preparadas de acordo com a proporção mássica apresentada no Quadro 4.1. Os itens 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3 apresentam a caracterização e análises do lodo de ETE, dos *bulking agents* e da matriz inicial, respectivamente.

5.2.1. Lodo de ETE

A matriz inicial dos ensaios 1, 2, 7 e 8 foi preparada utilizando lodo de ETE, anaeróbio desaguado em centrífuga após a adição de polímero, e *bulking agents*. A caracterização físico-química do lodo utilizado nos ensaios e a variação desses parâmetros na literatura são apresentadas no Quadro 5.1.

Observa-se que os valores de U, ST, SV, SF e pH para o lodo estão dentro da variação apresentada na literatura.

A densidade do lodo utilizado nos ensaios é 49% e 35% menor do que o limite inferior ($1,02 \text{ g.cm}^{-3}$) da variação presente na literatura, isto é, o lodo utilizado nos ensaios desta pesquisa é menos denso do que o lodo utilizado nos ensaios reportados na literatura. Ressalta-se que os artigos que apresentam valores de densidade para o lodo (CAI et al., 2012; 2016a; 2016b; WU et al., 2018; HAO; YANG; JAHNG, 2018), não descrevem o tipo de tratamento da ETE que gerou o lodo, apenas o artigo de Hao, Yang e Jahng (2018) cita que o lodo foi desaguado em prensa desaguadora.

Não foram reportados valores de FAS do lodo na literatura analisada, apenas para a matriz.

Quadro 5.1 – Caracterização físico-química do lodo utilizado nos ensaios 1, 2, 7 e 8 de biossecagem e a faixa de valores presentes na literatura

| Ensaio | U (%) b.u. | ST (%) b.u. | SV (%) b.s. | SF (%) b.s. | Densidade (g.cm^{-3}) | pH | FAS (%) |
|--|---------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------------|-----------|------------|
| Ensaio 1 e 2 | 79,37 | 20,63 | 58,00 | 42,00 | 0,521 | 6,24 | 53,20 |
| Ensaio 7 e 8 | 81,81 | 18,19 | 53,29 | 46,71 | 0,662 | 6,38 | 39,63 |
| Faixa de valores presentes na literatura | 61,8 - 88,25 | 11,75 - 38,2 | 46,6 - 85,2 | 14,8 - 53,4 | 1,02 - 1,04 | 6,1 - 7,7 | - |

Nota: U: umidade. ST: Sólidos Totais. SV: Sólidos Voláteis. SF: sólidos Fixos. FAS: *Free Air Space*. b.u.: base úmida. b.s.: base seca.

5.2.2. *Bulking agents*

Todos os ensaios utilizaram *bulking agents* na preparação das suas respectivas matrizes iniciais. A caracterização físico-química da serragem e da ração utilizadas como *bulking agents* nos ensaios é apresentada no Quadro 5.2, assim como a variação desses parâmetros na literatura.

Observa-se que os valores de U, ST, SV, SF e FAS da serragem estão dentro da variação geral apresentada na literatura. Contudo, ao comparar os valores da serragem com os valores apresentados da serragem utilizada na literatura, observa-se que todos os valores de SV não estão dentro da faixa.

Os valores da densidade da serragem não se encontram dentro da faixa geral ou específica, para a serragem, apresentada na literatura.

Em relação à ração, apenas o artigo de Almeida et al. (2019) utiliza ração, mas não apresenta a caracterização dos *bulking agents* utilizados. Portanto, a ração foi comparada com a variação geral presente na literatura. Todos os valores dos parâmetros (U, ST, SV, SF, densidade e FAS) da ração estão dentro da variação geral apresentada na literatura.

Não foram reportados valores de pH dos *bulking agents* na literatura analisada.

Quadro 5.2 – Caracterização físico-química da serragem utilizada nos ensaios de biossecagem e as faixas de valores presentes na literatura

| <i>Bulking agent</i> | Ensaio | U (%) b.u. | ST (%) b.u. | SV (%) b.s. | SF (%) b.s. | Densidade (g.cm ⁻³) | pH | FAS (%) |
|--|--------|---------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------------|------|-------------|
| Serragem | 1 e 2 | 8,82 | 91,18 | 85,76 | 14,24 | 0,136 | 5,18 | 93,44 |
| | 3 e 4 | 11,61 | 88,39 | 77,66 | 22,34 | 0,120 | 5,40 | 93,81 |
| | 5 e 6 | 10,97 | 89,03 | 83,05 | 16,95 | 0,107 | 5,16 | 94,65 |
| | 7 e 8 | 11,53 | 88,47 | 95,06 | 4,94 | 0,109 | 5,00 | 94,79 |
| Ração | 1 e 2 | 11,59 | 88,41 | 70,51 | 29,49 | 0,440 | 6,26 | 76,73 |
| | 3 e 4 | 9,78 | 90,22 | 68,67 | 31,33 | 0,495 | 6,25 | 74,12 |
| | 5 e 6 | 11,45 | 88,55 | 70,47 | 29,53 | 0,447 | 6,18 | 76,38 |
| | 7 e 8 | 11,37 | 88,63 | 71,79 | 28,21 | 0,436 | 6,06 | 77,10 |
| Faixa de valores presentes na literatura (apenas da serragem) | | 0,3 - 20,6 | 79,4 - 99,7 | 96,2 - 99,3 | 0,7 - 3,8 | 0,16 - 0,19 | - | 95,3 |
| Faixa de valores presentes na literatura (de todos os tipos de <i>bulking agents</i>) | | 0,3 - 48,4 | 51,6 - 99,7 | 66,92 - 99,3 | 0,7 - 33,08 | 0,16 - 0,53 | - | 70,5 - 95,3 |

Nota: U: umidade. ST: Sólidos Totais. SV: Sólidos Voláteis. SF: sólidos Fixos. FAS: *Free Air Space*. b.u.: base úmida. b.s.: base seca.

5.2.3. Matriz Inicial

O Quadro 5.3 apresenta a caracterização físico-química da matriz inicial dos ensaios de biossecagem assim como a variação desses parâmetros na literatura.

A umidade da matriz inicial de todos os ensaios então dentro da faixa descrita na literatura e na faixa de umidade ótima descrita por Yang, Zhang e Jahng (2014) de 50 a 70%.

Os valores do FAS da matriz inicial dos ensaios realizados, exceto do Ensaio 1, não estão dentro da faixa adequada apresentada por Yang, Zhang e Jahng (2014), que é de 56 a 60%. A variável com maior peso no cálculo do FAS é a densidade, sendo este um parâmetro inversamente proporcional. Os quatro maiores valores de densidade (apresentados no Quadro 5.3) são das matrizes dos Ensaios 2, 3, 4 e 6, sendo os quatro menores valores de FAS. Valores de FAS inferiores à 56 podem dificultar o processo de

biossecagem devido à má distribuição do ar injetado na matriz. Por outro lado, valores elevados de FAS (superiores à 60%) podem dificultar o processo de biossecagem devido à menor quantidade de água para as atividades de degradação dos microrganismos.

Quadro 5.3 – Caracterização físico-química da matriz inicial dos ensaios de biossecagem e a faixa de valores presentes na literatura

| Ensaio | U (%) b.u. | ST (%) b.u. | SV (%) b.s. | SF (%) b.s. | Densidade (g.cm ⁻³) | pH | FAS (%) |
|---|---------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------------|----------|-----------|
| 1 | 67,55 | 32,45 | 75,90 | 24,10 | 0,489 | 6,85 | 59,65 |
| 2 | 67,64 | 32,36 | 76,21 | 23,79 | 0,591 | 6,81 | 51,22 |
| 3 | 67,49 | 32,51 | 76,54 | 23,46 | 0,675 | 6,23 | 44,36 |
| 4 | 67,49 | 32,51 | 76,54 | 23,46 | 0,675 | 6,23 | 44,36 |
| 5 | 60,37 | 39,63 | 76,20 | 23,80 | 0,427 | 6,13 | 66,50 |
| 6 | 68,15 | 31,85 | 80,88 | 19,12 | 0,605 | 6,17 | 50,10 |
| 7 | 62,33 | 37,67 | 73,60 | 26,40 | 0,384 | 6,12 | 69,33 |
| 8 | 61,48 | 38,52 | 73,28 | 26,72 | 0,406 | 6,66 | 67,78 |
| Faixa de valores presentes na literatura | 59,1-78,2 | 21,8-40,9 | 52,7-95,52 | 4,48-47,3 | 0,273-0,80 | 7,3-7,40 | 50,4-69,7 |

Nota: U: umidade. ST: Sólidos Totais. SV: Sólidos Voláteis. SF: sólidos Fixos. FAS: *Free Air Space*. b.u.: base úmida. b.s.: base seca.

Os valores de pH da matriz de todos os ensaios estão abaixo da faixa apresentada na literatura. Isso pode ser devido à composição e proporção mássica da matriz e aos valores de pH dos *bulking agents* utilizados nos ensaios. Cabe ressaltar que a literatura não apresenta os valores de pH dos *bulking agents*, impedindo assim a comparação, porém o valor de pH do lodo utilizado nos ensaios encontra-se dentro da faixa apresentada na literatura (Quadro 5.1).

Os valores de SV e de densidade da matriz inicial de todos os ensaios estão dentro das faixas apresentadas na literatura.

5.3. DESENVOLVIMENTO DA BIOSSECAGEM NOS ENSAIOS

5.3.1. Temperatura da matriz

Um dos principais parâmetros monitorados e analisados durante a biossecagem é a temperatura. O gráfico do Apêndice B apresenta a temperatura registrada pelo sensor ao longo dos oito ensaios realizados, incluindo os períodos que o sensor não estava inserido na matriz durante o revolvimento. É possível observar que há algumas lacunas no gráfico, pois o sensor parou de ler e registrar a temperatura ou houve queda de energia no laboratório (por exemplo, o dia 11 dos ensaios 5 e 6, no qual houve o desligamento da energia da universidade para manutenção).

No Quadro 5.4 é apresentada a duração de cada ensaio em horas, assim como o tempo de duração no qual a temperatura foi registrada ou não. Observa-se que a

porcentagem do tempo de temperatura registrada aumenta do Ensaio 1 para o Ensaio 8, pois ao identificar tal problema, melhorias foram feitas, como a verificação e manutenção do sensor de temperatura e do programa, assim como a utilização do estabilizador no computador e monitoramento continuado para reiniciar o programa com mais frequência, caso parasse de registrar as medidas de temperatura.

Quadro 5.4 – Caracterização temporal do monitoramento da temperatura ao longo dos ensaios

| | Ensaio 1 | Ensaio 2 | Ensaio 3 | Ensaio 4 | Ensaio 5 | Ensaio 6 | Ensaio 7 | Ensaio 8 |
|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tempo total (h) | 478,2 | 478,9 | 577,0 | 579,3 | 382,0 | 383,1 | 481,7 | 482,9 |
| Tempo não registrado (h) | 262,2 | 262,2 | 262,1 | 262,1 | 152,6 | 152,6 | 139,6 | 139,6 |
| Tempo não registrado (%) | 54,8% | 54,8% | 45,4% | 45,2% | 39,9% | 39,8% | 29,0% | 28,9% |
| Tempo registrado (%) | 45,2% | 45,2% | 54,6% | 54,8% | 60,1% | 60,2% | 71,0% | 71,1% |

Para facilitar a visualização gráfica e analisar a temperatura da matriz ao longo da biossecagem, foram feitas as seguintes ações:

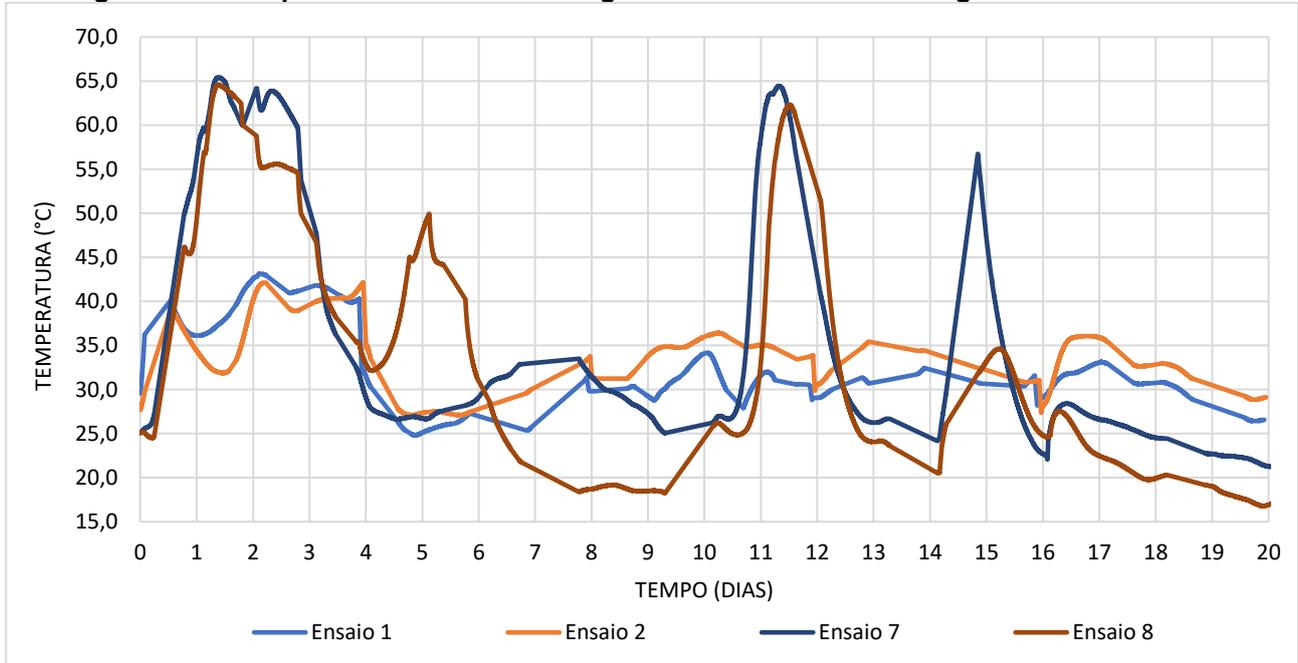
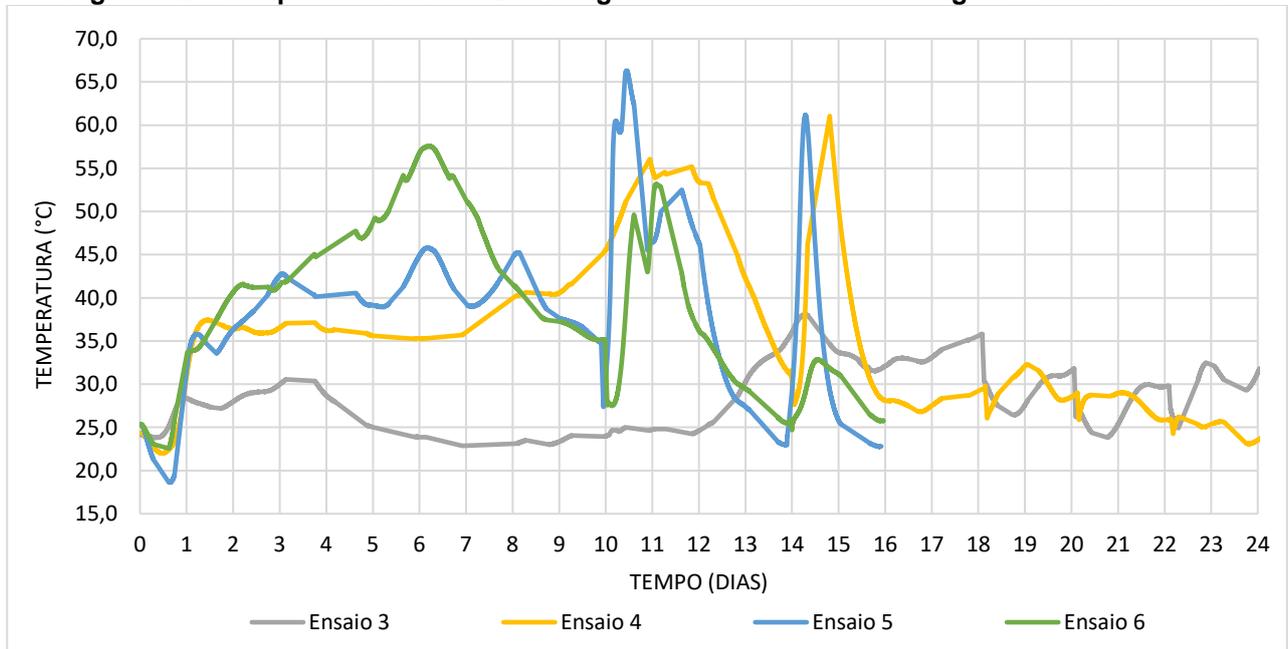
- Os valores da temperatura registrados durante o revolvimento, isto é, durante o período que o sensor não ficou em contato com a matriz foram excluídos;
- Ao gerar o gráfico, todos os pontos foram conectados por uma linha, mesmo se as células estivessem vazias, isto é, sem o valor da temperatura registrada;
- No 10º dia dos ensaios 7 e 8, o compressor de ar precisou ser desligado para conserto e manutenção por um período de 5 dias. Nesse período (do 10º ao 15º dia) os ensaios ficaram parados sem aeração forçada. Portanto, os valores de temperatura registrados durante esse período foram excluídos. Quando o compressor de ar ficou pronto, a aeração foi retomada nos reatores dos Ensaios 7 e 8. Dessa forma os Ensaios 7 e 8 tiveram duração de 20 dias e não 25 dias, conforme é apresentado no gráfico de temperatura registrada nos Ensaios no Apêndice B.

Conforme apresentado no item 3.2.1, a biossecagem pode ser avaliada de acordo com a temperatura da matriz. Nas figuras, Figura 5.1 e Figura 5.2, são apresentadas a evolução da temperatura da matriz durante a biossecagem para a série de ensaios com e sem lodo, respectivamente.

No Quadro 5.5 são apresentados os valores de temperatura máxima, mínima e média dos ensaios de biossecagem.

Quadro 5.5 – Temperatura máxima, mínima e média dos ensaios de biossecagem

| Temperatura (°C) | Ensaio 1 | Ensaio 2 | Ensaio 3 | Ensaio 4 | Ensaio 5 | Ensaio 6 | Ensaio 7 | Ensaio 8 |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Máxima | 43,13 | 42,13 | 38,06 | 61,06 | 66,31 | 57,56 | 65,44 | 64,62 |
| Mínima | 24,81 | 27,06 | 22,87 | 22,00 | 18,62 | 22,56 | 21,05 | 16,75 |
| Média | 32,34 | 33,73 | 29,08 | 33,48 | 38,77 | 38,87 | 34,51 | 31,91 |

Figura 5.1 – Temperatura da matriz ao longo dos ensaios de biossecagem – Série com lodo**Figura 5.2 – Temperatura da matriz ao longo dos ensaios de biossecagem – Série sem lodo**

Observa-se que as temperaturas máximas dos Ensaios 1, 2 e 3 são 43,13, 42,13 e 38,06°C, respectivamente. Esses valores são inferiores à temperatura da fase termofílica que é superior a 50°C (CAI et al., 2016a, 2016b, 2017, 2018a, 2018b; WU et al., 2018).

A temperatura da matriz dos Ensaio 1 e 2 apresentam comportamentos similares. Após o início dos ensaios, as temperaturas possuíam tendência de aumento, mesmo apresentando oscilações. Ambos os ensaios atingiram suas temperaturas máximas nos primeiros quatro dias. No 4º dia (D4) foi realizado o revolvimento de ambas as matrizes e pode-se observar uma queda brusca da temperatura que se manteve baixa até aproximadamente o 5º dia. Novamente, a temperatura das matrizes apresentou tendências de aumento com oscilações até o 8º dia, quando foi realizado o revolvimento. Após os revolvimentos nos dias D8 e D12, as temperaturas das matrizes dos ensaios oscilaram, não apresentando tendências claras de aumento ou queda. Aproximadamente 1 dia após o revolvimento no D16, observou-se um aumento da temperatura das matrizes de 28,19 para 33,13°C e de 27,37 para 36,06°C no Ensaio 1 e 2, respectivamente. Após esse período as temperaturas apresentaram tendências de queda até o final do ensaio (D20).

A temperatura da matriz do Ensaio 3 se manteve na faixa de 22,87 a 30,56°C nos 10 primeiros dias, apresentando oscilações. Após realizar o revolvimento no dia D10, a temperatura da matriz atingiu sua temperatura máxima (38,06°C) próximo ao 14º dia. Entre o 14º e 18º dia a temperatura da matriz foi superior à 30°C, mas não atingiu 40°C. Após os revolvimentos no 18º, 20º e 22º dias, observou-se uma tendência de aumento da temperatura da matriz, mas que não atingiu 35°C. No 20º dia foi realizado o revolvimento e a taxa de ar foi aumentada de 1 para 3 L.min⁻¹.kgST⁻¹, observou-se uma queda na temperatura da matriz no dia seguinte e posteriormente a temperatura aumentou. No 22º dia foi realizado o revolvimento e a taxa de ar foi aumentada de 3 para 4 L.min⁻¹.kgST⁻¹, a temperatura da matriz diminuiu durante aproximadamente 4 horas e então aumentou.

A matriz do Ensaio 4 possuía uma temperatura de 24,25°C no início no experimento. Após cerca de 11 horas, a temperatura baixou até atingir 22°C e aumentou até atingir 37,44°C em aproximadamente 1 dia. A temperatura da matriz se manteve constante próximo a 35°C entre o 1º e 7º dia do ensaio. Após esse período, a temperatura subiu até atingir 56,06°C no 11º dia e se mantendo nessa temperatura por um dia. Entre o 12º e 14º dia, a temperatura da matriz caiu até atingir o valor de 30,81°C. Foi realizado o revolvimento no 14º dia. Após um dia desse revolvimento, a temperatura da matriz atingiu seu valor máximo de 61,06°C e no dia seguinte caiu bruscamente atingindo valores inferiores a 30°C. Após o revolvimento no 18º dia, a temperatura subiu atingindo valores inferiores a 35°C e voltou a cair. No 20º dia foi realizado o revolvimento e a taxa de ar foi aumentada de 2 para 3 L.min⁻¹.kgST⁻¹. No 22º dia foi realizado o revolvimento e a taxa de ar foi aumentada de 2 para 3 L.min⁻¹.kgST⁻¹. Houve pouca

variação de temperatura da matriz antes e depois desses revolvimentos. Assim, a evolução da temperatura da matriz do Ensaio 4 pode ser classificada, segundo Cai et al. (2016a, 2016b, 2017, 2018a, 2018b) e Wu et al. (2018), em: fase mesofílica (D0 a D10), fase termofílica inicial (D10 a D14), fase termofílica secundária (D14 a D15) e fase de resfriamento (D15 a D24).

Comparando os Ensaio 3 e 4, que possuem a mesma proporção mássica e umidade da matriz inicial, mas diferentes taxas de aeração, é possível observar que a temperatura da matriz do Ensaio 4 subiu atingindo 61°C, enquanto a temperatura da matriz do Ensaio 3 não atingiu temperaturas superiores à 39°C. Portanto, a taxa de aeração de 1 L.min⁻¹.kgST⁻¹ utilizada no Ensaio 3 foi insuficiente para o processo de biossecagem. Dessa forma, é importante ressaltar a necessidade de injetar na matriz a quantidade de ar adequada para a biossecagem, isto é, suficiente para as atividades dos microrganismos, mas que não diminua a temperatura da matriz.

A temperatura da matriz do Ensaio 5 no início do experimento era de 25,31°C. Após cerca de 15 horas, a temperatura baixou até atingir 18,62°C e nas 14 horas seguintes aumentou até atingir 35,81°C. A temperatura da matriz oscilou na faixa de 32 a 46°C entre o 1° e 10° dia de ensaio. Depois de 12 horas do revolvimento realizado no 10° dia de ensaio, a temperatura da matriz subiu atingindo seu valor máximo de 66,31°C e nas 11 horas seguintes caiu bruscamente atingindo 45,50°C. Esse comportamento repetiu-se, sendo que a temperatura atingiu 52,50°C em 18 horas retornando a valores próximos a 46,38°C no 12° dia. Entre o 12° e 14° dia a temperatura continuou caindo atingindo 22,94°C. Foi realizado revolvimento no 14° dia, após 8 horas a temperatura da matriz atingiu 61,19°C e depois diminuiu até atingir 22,81°C no final do ensaio. Assim, a evolução da temperatura da matriz do Ensaio 5 pode ser classificada em: fase mesofílica (D0 a D10), fase termofílica inicial (D10 a D11), fase termofílica secundária (D11 a D14,5) e fase de resfriamento (D14,5 a D16).

A temperatura inicial da matriz do Ensaio 6 foi de 25,25°C. Após cerca de 15 horas, a temperatura baixou até atingir 22,56°C, em seguida aumentou até atingir 57,56°C próximo ao 6° dia e diminuiu até 35,19°C no 10° dia. Foi realizado o revolvimento do 10° dia. Após o revolvimento a temperatura da matriz apresentou dois picos de temperatura em um dia. O primeiro atingiu 49,63°C e o segundo 53,19°C. Foi realizado revolvimento no 14° dia, pois a temperatura da matriz apresentava tendência de diminuição desde o 11° dia. Houve um pequeno aumento da temperatura da matriz após o revolvimento, contudo atingiu valor máximo de 32,88°C. Assim, a evolução da temperatura da matriz do Ensaio 6 pode ser classificada em: fase mesofílica (D0 a D5),

fase termofílica inicial (D5 a D7), fase termofílica secundária (D7 a D11,5) e fase de resfriamento (D11,5 a D16).

Comparando os Ensaio 5 e 6, observa-se que a temperatura da matriz do Ensaio 5 (umidade inicial de 60% e taxa de aeração de $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$) subiu mais atingindo 66°C , contudo esse processo demorou aproximadamente 10 dias. Por outro lado, a temperatura da matriz do Ensaio 6 (umidade inicial de 68% e taxa de aeração de $3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$) atingiu valor máximo de 57°C (menor que a temperatura máxima do Ensaio 5), porém em um menor tempo (6 dias). Assim, adotou-se os valores de 60% para a umidade da matriz inicial e $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$ para a taxa de aeração nos Ensaio 7 e 8.

A temperatura da matriz do Ensaio 7 no início do experimento foi de $25,06^\circ\text{C}$ e atingiu sua temperatura máxima de $65,44^\circ\text{C}$ em 1 dia e 9 horas. A matriz permaneceu com temperaturas superiores a 50°C durante 2,1 dias. Após esse período a temperatura diminuiu até atingir $29,06^\circ\text{C}$ no 4º dia do ensaio. Entre o 4º e o 10º dia de ensaio, a temperatura subiu até atingir $33,50^\circ\text{C}$ e depois voltou a cair. Após o revolvimento no 10º dia, a temperatura subiu atingindo o valor de $64,44^\circ\text{C}$ e depois caiu. Após o revolvimento no 14º dia, o mesmo comportamento ocorreu, sendo que a temperatura atingiu $56,75^\circ\text{C}$. Após o último revolvimento realizado no 16º dia, a temperatura subiu até atingir $28,44^\circ\text{C}$ e diminuiu até atingir $21,25^\circ\text{C}$ no último dia de ensaio. Assim, a evolução da temperatura da matriz do Ensaio 7 pode ser classificada em: fase mesofílica (D0 a D1), fase termofílica inicial (D1 a D3), fase termofílica secundária (D10 a D15) e fase de resfriamento (D15 a D20).

A temperatura da matriz do Ensaio 8 no início do experimento era de $25,06^\circ\text{C}$, atingindo temperatura máxima de $64,62^\circ\text{C}$ em 1 dia e 9 horas. Durante 1,8 dias, a temperatura da matriz foi superior a 50°C . Após esse período a temperatura diminuiu até atingir $32,13^\circ\text{C}$ próximo ao 4º dia de ensaio. Entre o 4º e o 10º dia de ensaio, a temperatura subiu até atingir $49,94^\circ\text{C}$ no 5º dia e depois voltou a cair. Após o revolvimento no 10º dia, a temperatura subiu atingindo o valor de $62,31^\circ\text{C}$ e depois caiu. O mesmo comportamento ocorreu, após o revolvimento no 14º dia, o sendo que a temperatura atingiu $34,63^\circ\text{C}$. Após o último revolvimento realizado no 16º dia, a temperatura subiu até atingir $27,65^\circ\text{C}$ e diminuiu até atingir $17,25^\circ\text{C}$ no último dia de ensaio. Assim, a evolução da temperatura da matriz do Ensaio 8 pode ser classificada em: fase mesofílica (D0 a D1), fase termofílica inicial (D1 a D3), fase termofílica secundária (D10 a D12) e fase de resfriamento (D12 a D20).

Segundo Yang, Zhang e Jahng (2014), o rápido aumento da temperatura da matriz é uma indicação da degradação microbiana da matéria orgânica e concomitantemente da

liberação do calor metabólico. Tal comportamento pode ser observado no início dos Ensaios 7 e 8 e após o revolvimento da matriz no 10º dia para os Ensaios 5, 6, 7 e 8 e no 14º dia para o Ensaio 4, 5 e 7.

É possível observar pelos gráficos (Figura 5.1 e Figura 5.2) que a temperatura das matrizes dos ensaios 7 e 8 atingiram a fase termofílica em um período de aproximadamente 1 dia, sendo que o Ensaio 6, atingiu essa fase depois do 5º dia de ensaio e os Ensaio 4 e 5 após o 10º dia de ensaio.

No Quadro 5.6 é apresentada a sistematização sobre os períodos nos quais a temperatura das matrizes dos Ensaios 4, 5, 6, 7 e 8 foram iguais ou superiores à 50°C. Observa-se que a temperatura da matriz foi superior ou igual a 50°C em dois períodos nos Ensaios 4, 6 e 8 e em três períodos nos Ensaios 5 e 7. O Ensaio 7 foi o ensaio que manteve a temperatura da matriz igual ou superior à 50°C por mais tempo (70h) enquanto o Ensaio 5 foi o que manteve por menos tempo (30h). Segundo Yang, Zhang e Jahng (2014), para a remoção de umidade da matriz é preferível manter elevada temperatura da matriz pelo maior período possível, pois altos valores de temperatura da matriz permitem a vaporização da umidade que é removida pela aeração forçada. Ademais, segundo Reis (2017), temperaturas elevadas facilitam a quebra da partícula facilitando assim a remoção de água intersticial, superficial e intracelular presente no lodo. Dessa forma, quanto maior o tempo que a temperatura da matriz permanece com valores elevados, maior tende a ser a quantidade de umidade transformada em vapor.

Quadro 5.6 – Períodos nos quais a temperatura das matrizes dos Ensaios 4, 5, 6, 7 e 8 foram superiores ou iguais a 50°C

| Período no qual a temperatura da matriz $\geq 50^\circ\text{C}$ | | Ensaio 4 | Ensaio 5 | Ensaio 6 | Ensaio 7 | Ensaio 8 |
|---|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1º | Início | 10,36º dia | 10,13º dia | 5,33º dia | 0,78º dia | 1,01º dia |
| | Final | 12,32º dia | 10,61º dia | 7,17º dia | 2,85º dia | 2,85º dia |
| | Tempo total com $T \geq 50^\circ\text{C}$ (dia) | 1,96 | 0,48 | 1,85 | 2,07 | 1,84 |
| 2º | Início | 14,81º dia | 11,19º dia | 10,99º dia | 10,88º dia | 11,16º dia |
| | Final | 15,01º dia | 11,68º dia | 11,19º dia | 11,61º dia | 12,09º dia |
| | Tempo total com $T \geq 50^\circ\text{C}$ (dia) | 0,20 | 0,50 | 0,19 | 0,73 | 0,92 |
| 3º | Início | - | 14,17º dia | - | 14,85º dia | - |
| | Final | - | 14,45º dia | - | 14,95º dia | - |
| | Tempo total com $T \geq 50^\circ\text{C}$ (dia) | - | 0,28 | - | 0,11 | - |
| Soma dos tempos totais com $T \geq 50^\circ\text{C}$ (dia) | | 2,2 | 1,3 | 2,0 | 2,9 | 2,8 |
| Soma dos tempos totais com $T \geq 50^\circ\text{C}$ (horas) | | 52 | 30 | 49 | 70 | 66 |

5.3.2. Revolvimento

O revolvimento nos Ensaios 1 e 2 foi predefinido para ser realizado a cada 4 dias. Analisando a evolução da temperatura desses dois ensaios (Figura 5.1), observou-se que

a temperatura da matriz antes dos revolvimentos apresentava tendência de aumento e, ao realizar o revolvimento, a temperatura da matriz diminuiu e, posteriormente, não atingiu valores superiores à 40°C. Desse modo, o processo da biossecagem foi impactado pelo revolvimento, pois este interferiu na evolução da temperatura da matriz, que apresentava tendência de aumento.

Assim, para os Ensaio 3 e 4 alterou-se o procedimento, realizando o revolvimento conforme a evolução da temperatura da matriz, isto é, apenas realizou-se o revolvimento quando a temperatura da matriz apresentou tendência de diminuição. Tal procedimento foi proposto, pois o revolvimento diminui a temperatura da matriz quando esta é superior à temperatura ambiente. Analisando a evolução da temperatura dos Ensaio 3 e 4 (Figura 5.2), observou-se que o revolvimento não diminuiu a temperatura da matriz de forma significativa e que posteriormente ocorreu o aumento da temperatura da matriz.

Dessa forma, o revolvimento conforme a evolução da temperatura da matriz se mostrou mais eficiente do que o revolvimento realizado a cada 4 dias. Portanto, esse procedimento foi adotado para os Ensaio 5, 6, 7 e 8.

No Quadro 5.7 são apresentados os dias nos quais foram realizados os revolvimentos da matriz para cada ensaio.

Quadro 5.7 – Realização de revolvimento da matriz durante os ensaios de biossecagem

| Ensaio | Revolvimento |
|--------|---------------------|
| 1 | D4, D8, D12 e D16 |
| 2 | D4, D8, D12 e D16 |
| 3 | D10, D18, D20 e D22 |
| 4 | D14, D18, D20 e D22 |
| 5 | D10 e D14 |
| 6 | D10 e D14 |
| 7 | D10, D14 e D16 |
| 8 | D10, D14 e D16 |

Nota: 'D' refere-se a Dia.

É possível observar pelos gráficos de temperatura (Figura 5.1 e Figura 5.2) que no momento do revolvimento a temperatura da matriz diminuiu ou manteve-se próxima ao valor da matriz antes do revolvimento, quando a temperatura da matriz era próxima à temperatura ambiente.

O revolvimento realizado no 4º e 8º dia dos Ensaio 1 e 2 e no 18º e 20º do Ensaio 3 foram realizados quando a evolução da temperatura apresentava tendência de aumento (Figura 5.1 e Figura 5.2), após o revolvimento ocorreu uma queda da temperatura que não voltou a atingir os valores anteriores ao revolvimento. Em contrapartida, os outros revolvimentos realizados fizeram com que a temperatura da matriz atingisse valores superiores às temperaturas anteriores ao revolvimento.

Nos ensaios realizados por Zhao et al. (2010), os picos de temperatura da matriz após a realização dos revolvimentos foram inferiores ao primeiro pico de temperatura antes do primeiro revolvimento. Tal comportamento pode ser observado nos ensaios realizados nessa pesquisa, exceto nos Ensaios 3, 4 e 5, nos quais o segundo pico atingiu temperaturas superiores ao primeiro pico. Tal fato, também foi observado no Teste B de Zhao et al. (2011a). Nos Ensaios 3, 4 e 5, uma possibilidade que pudesse explicar esse comportamento é que a matriz inicial não estava em condições ótimas de distribuição e quantidade de umidade e/ou FAS e que, após o revolvimento, que tem como função homogeneizar a matriz, essas características foram melhoradas e assim ocorreu um pico maior de temperatura do que o anterior.

5.3.3. Umidade da matriz

O Quadro 5.8 apresenta os valores médios da umidade da matriz durante os ensaios de biossecagem e a Figura 5.3 apresenta o respectivo gráfico.

Observa-se que a umidade da matriz dos Ensaios 1, 2, 3, 4 e 6 teve pouca alteração ao longo do ensaio, sendo que nos Ensaios 1 a 4, a matriz final apresentou umidade mais elevada do que a matriz inicial. Tal fato pode ser explicado pela: geração de água pelo metabolismo microbiano durante a degradação da matéria orgânica; pelos baixos valores de temperatura da matriz para os Ensaios 1 a 3, que dificultam a vaporização da umidade e, conseqüentemente, sua remoção; pelo alto teor de umidade (aproximadamente 68%) da matriz inicial dos Ensaios 1, 2, 3, 4 e 6, que leva a saturação dos poros da matriz, dificultando a circulação de ar, e; pelo baixo valor da taxa de aeração ($1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$) no Ensaios 1, 2 e 3, limitando assim a quantidade de oxigênio para os microrganismos e a remoção de água da matriz.

Quadro 5.8 – Umidade, em %, da matriz durante os ensaios de biossecagem

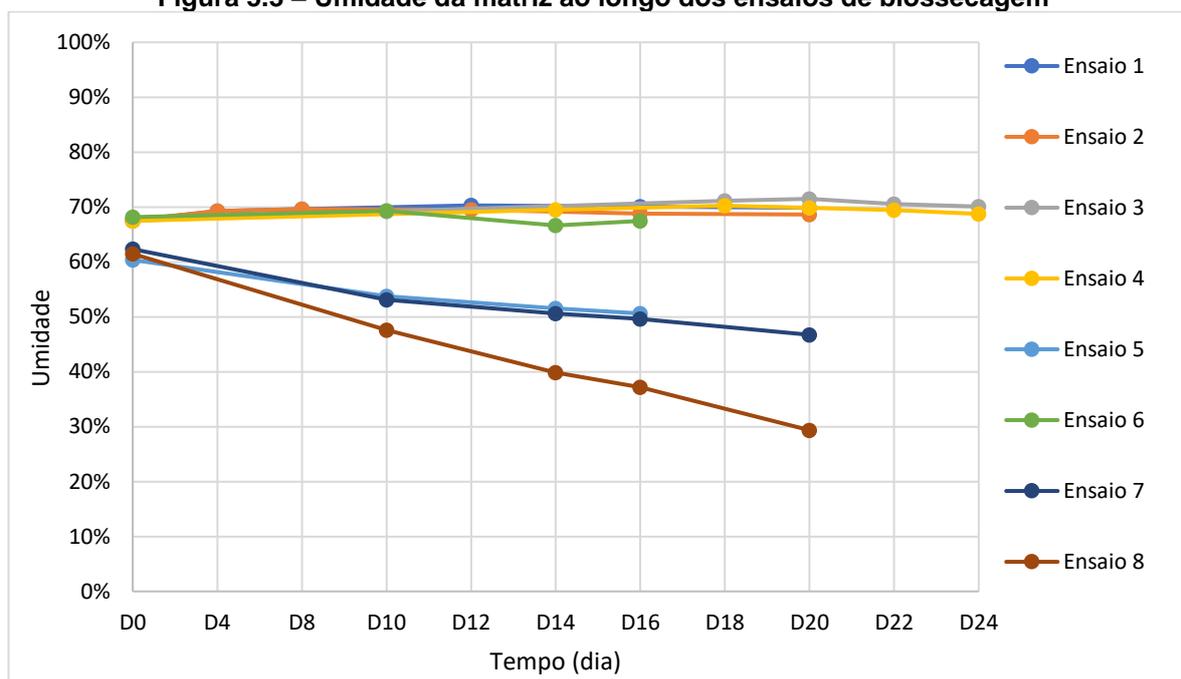
| Dia do revolvimento | Ensaio 1 | Ensaio 2 | Ensaio 3 | Ensaio 4 | Ensaio 5 | Ensaio 6 | Ensaio 7 | Ensaio 8 |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| D0 | 67,55 | 67,64 | 67,49 | 67,49 | 60,37 | 68,15 | 62,33 | 61,48 |
| D4 | 69,26 | 69,30 | - | - | - | - | - | - |
| D8 | 69,63 | 69,63 | - | - | - | - | - | - |
| D10 | - | - | 69,21 | - | 53,76 | 69,31 | 53,14 | 47,61 |
| D12 | 70,30 | 69,51 | - | - | - | - | - | - |
| D14 | - | - | - | 69,52 | 51,57 | 66,65 | 50,64 | 39,85 |
| D16 | 70,10 | 68,83 | - | - | 50,62 | 67,48 | 49,62 | 37,20 |
| D18 | - | - | 71,14 | 70,26 | - | - | - | - |
| D20 | 69,86 | 68,63 | 71,50 | 69,83 | - | - | 46,73 | 29,36 |
| D22 | - | - | 70,54 | 69,44 | - | - | - | - |
| D24 | - | - | 70,09 | 68,74 | - | - | - | - |

Nota: 'D' refere-se a Dia.

A umidade da matriz dos Ensaios 5, 7 e 8 diminuiu ao longo do processo de biossecagem de 60,37, 62,33 e 61,48% para 50,62, 46,73 e 29,36%, respectivamente.

Nesses três ensaios, a umidade da matriz inicial era mais baixa ao comparar com os outros ensaios.

Figura 5.3 – Umidade da matriz ao longo dos ensaios de biossecagem



Nota: 'D' refere-se a Dia.

Para a utilização de um resíduo para a geração de energia por meio de processo de combustão, é necessário que o ST atinja o valor mínimo de 45% (equivalente à umidade máxima de 55%) segundo Kudra et al. (2002) apud Reis et al. (2019) ou ST mínimo de 57% (equivalente à umidade máxima de 43%) segundo Gyllenhammer (1998) apud Reis (2017) e Zhao et al. (1999) apud Reis (2017).

Nesse sentido, os valores de umidade das matrizes dos Ensaios 5, 7 e 8, que foram os três ensaios com umidade da matriz inicial próxima de 60%, a partir do 10º dia estão abaixo de 55%, portanto, segundo Kudra et al. (2002) apud Reis et al. (2019) essas matrizes podem ser utilizadas para a geração de energia por combustão.

Por outro lado, comparando os resultados da umidade das matrizes dos ensaios realizados com o valor de umidade máxima de 43% do resíduo para a geração de energia por combustão, segundo Gyllenhammer (1998) apud Reis (2017) e Zhao et al. (1999) apud Reis (2017), apenas a matriz do Ensaio 8, a partir do 14º dia, pode ser utilizada para combustão.

Conforme mencionado no item 4.4, os Ensaios 3, 4, 5 e 6 foram realizados sem lodo para entendimento do processo de biossecagem. Dessa forma, é importante ressaltar que, ao analisar os resultados desses ensaios, observou-se que o Ensaio 5 teve melhor desempenho, reduziu a umidade da matriz de 60% para 50%. Assim, adotou-se

para os Ensaio 7 e 8 os mesmos parâmetros utilizados no Ensaio 5, umidade da matriz inicial de 60% e taxa de aeração de 2 L.min⁻¹.kgST⁻¹.

5.3.4. Sólidos Voláteis da matriz

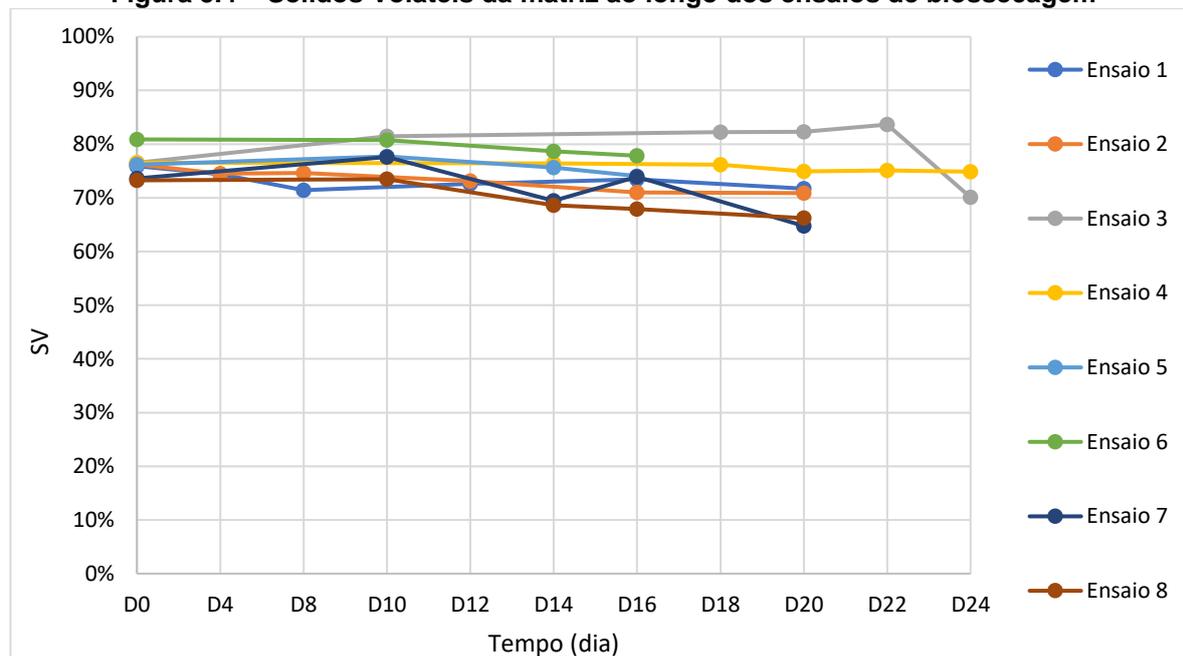
O Quadro 5.9 apresenta os valores médios de SV da matriz durante os ensaios de biossecagem e a Figura 5.4 apresenta o respectivo gráfico.

Quadro 5.9 – Sólidos Voláteis, em %, da matriz durante os ensaios de biossecagem

| | Ensaio 1 | Ensaio 2 | Ensaio 3 | Ensaio 4 | Ensaio 5 | Ensaio 6 | Ensaio 7 | Ensaio 8 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| D0 | 75,90 | 76,21 | 76,54 | 76,54 | 76,20 | 80,88 | 73,60 | 73,28 |
| D4 | 74,38 | 74,53 | - | - | - | - | - | - |
| D8 | 71,43 | 74,63 | - | - | - | - | - | - |
| D10 | - | - | 81,46 | - | 77,71 | 80,72 | 77,60 | 73,47 |
| D12 | 72,59 | 73,11 | - | - | - | - | - | - |
| D14 | - | - | - | 76,43 | 75,64 | 78,65 | 69,43 | 68,59 |
| D16 | 73,46 | 70,98 | - | - | 74,05 | 77,84 | 73,94 | 67,92 |
| D18 | - | - | 82,27 | 76,17 | - | - | - | - |
| D20 | 71,73 | 70,88 | 82,30 | 74,92 | - | - | 64,76 | 66,22 |
| D22 | - | - | 83,64 | 75,08 | - | - | - | - |
| D24 | - | - | 70,09 | 74,87 | - | - | - | - |

Nota: 'D' refere-se a Dia.

Figura 5.4 – Sólidos Voláteis da matriz ao longo dos ensaios de biossecagem



Nota: 'D' refere-se a Dia.

O aumento da temperatura está diretamente relacionado com a redução de SV, devido à degradação da matéria orgânica (REIS et al., 2019). É possível observar no Quadro 5.9 e na Figura 5.4 que os valores de SV se mantêm na faixa de 64,76 a 83,64%, sem grandes oscilações, durante todos os ensaios.

Cabe ressaltar que Reis et al. (2019), por meio da revisão da literatura, observou que o poder calorífico do lodo biosseco é diretamente relacionado com os valores SV.

Dessa forma, quanto maior a quantidade de SV, maior tende a ser a quantidade de matéria orgânica e, conseqüentemente, maior o poder calorífico.

Os valores de SV da matriz inicial variou de 73,28 a 80,88% e na matriz final dos ensaios, conforme Quadro 5.9, variaram na faixa de 64,76 a 77,84%, valores dentro da faixa da matriz final dos ensaios da literatura (50,3-86,5%).

Os ensaios 1 a 6 mantiveram o teor de SV na matriz final acima de 70%, sendo o melhor resultado 77,84% no ensaio 6 que também iniciou com o maior valor de SV (80,88%). Já os valores de SV da matriz final dos Ensaios 7 e 8 foram de 64,76 e 66,22%, respectivamente, iniciando os ensaios com SV de 73,60 e 73,28%.

5.3.5. pH da matriz

O Quadro 5.10 apresenta os valores médios de pH da matriz durante os ensaios de biossecagem e a Figura 5.5 apresenta o respectivo gráfico.

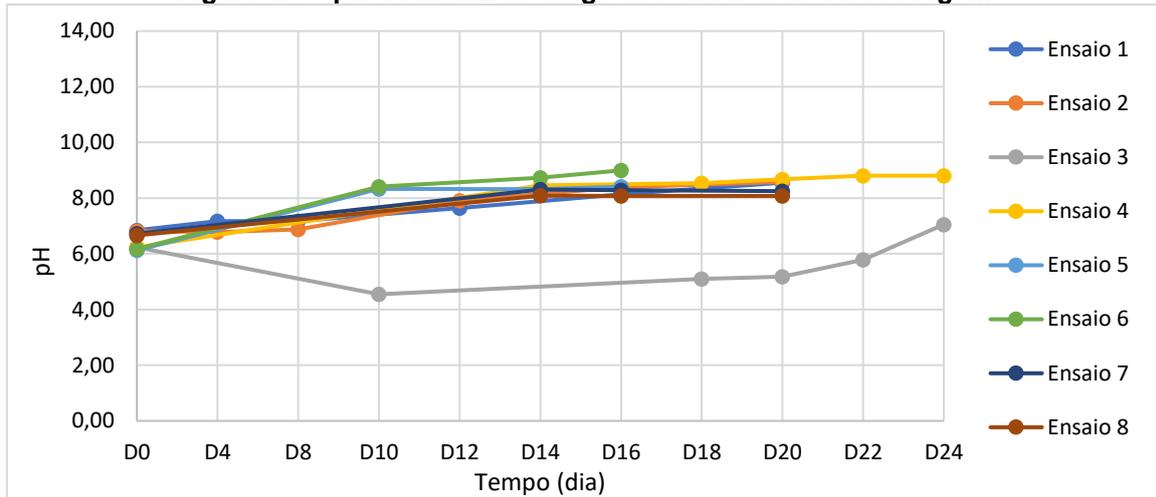
Segundo Wu et al. (2018), o pH é uma variável para monitorar a qualidade e a maturidade do composto. O aumento dos valores do pH ocorre devido à liberação de amônia durante a amonificação e mineralização do nitrogênio orgânico. Tal fato pode ser observado em todos os ensaios, exceto durante os primeiros 10 dias do Ensaio 3, nos quais houve uma diminuição dos valores de pH.

Quadro 5.10 – pH da matriz durante os ensaios de biossecagem

| | Ensaio 1 | Ensaio 2 | Ensaio 3 | Ensaio 4 | Ensaio 5 | Ensaio 6 | Ensaio 7 | Ensaio 8 |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| D0 | 6,85 | 6,81 | 6,23 | 6,23 | 6,13 | 6,17 | 6,72 | 6,66 |
| D4 | 7,17 | 6,78 | - | - | - | - | - | - |
| D8 | 7,17 | 6,88 | - | - | - | - | - | - |
| D10 | - | - | 4,55 | - | 8,33 | 8,41 | - | - |
| D12 | 7,64 | 7,91 | - | - | - | - | - | - |
| D14 | - | - | - | 8,45 | 8,32 | 8,73 | 8,31 | 8,09 |
| D16 | 8,13 | 8,39 | - | - | 8,41 | 9,00 | 8,29 | 8,08 |
| D18 | - | - | 5,10 | 8,54 | - | - | - | - |
| D20 | 8,55 | 8,58 | 5,18 | 8,68 | - | - | 8,26 | 8,08 |
| D22 | - | - | 5,79 | 8,81 | - | - | - | - |
| D24 | - | - | 7,05 | 8,81 | - | - | - | - |

Nota: 'D' refere-se a Dia.

Figura 5.5 – pH da matriz ao longo dos ensaios de biossecagem



Os valores de pH da matriz final dos ensaios variam de 7,05 a 9,00 valores superiores a faixa de pH apresentada na literatura (5,7 a 8,17).

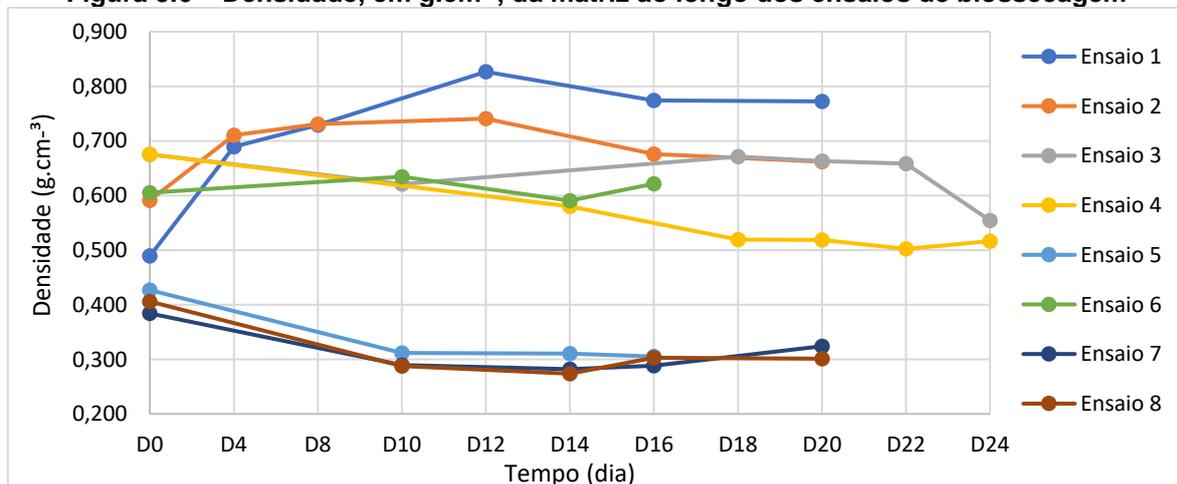
5.3.6. Densidade e FAS da matriz

O Quadro 5.11 apresenta os valores médios de densidade da matriz durante os ensaios de biossecagem e a Figura 5.6 apresenta o respectivo gráfico.

Quadro 5.11 – Densidade, em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, da matriz durante os ensaios de biossecagem

| | Ensaio 1 | Ensaio 2 | Ensaio 3 | Ensaio 4 | Ensaio 5 | Ensaio 6 | Ensaio 7 | Ensaio 8 |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| D0 | 0,489 | 0,591 | 0,675 | 0,675 | 0,427 | 0,605 | 0,384 | 0,406 |
| D4 | 0,689 | 0,710 | - | - | - | - | - | - |
| D8 | 0,729 | 0,731 | - | - | - | - | - | - |
| D10 | - | - | 0,621 | - | 0,312 | 0,634 | 0,289 | 0,288 |
| D12 | 0,826 | 0,741 | - | - | - | - | - | - |
| D14 | - | - | - | 0,580 | 0,311 | 0,591 | 0,282 | 0,274 |
| D16 | 0,774 | 0,676 | - | - | 0,305 | 0,621 | 0,289 | 0,303 |
| D18 | - | - | 0,671 | 0,519 | - | - | - | - |
| D20 | 0,772 | 0,662 | 0,663 | 0,519 | - | - | 0,324 | 0,301 |
| D22 | - | - | 0,658 | 0,502 | - | - | - | - |
| D24 | - | - | 0,554 | 0,516 | - | - | - | - |

Nota: "D" refere-se a Dia.

Figura 5.6 – Densidade, em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, da matriz ao longo dos ensaios de biossecagem

Observa-se que os valores de densidade variam ao longo do processo de biossecagem. A densidade da matriz dos Ensaio 1 e 2 aumentou com o passar do tempo, isto é, a matriz se tornou mais compacta, afetando o FAS e consequentemente dificultando a degradação da matéria orgânica e a elevação da temperatura da matriz. A densidade da matriz do Ensaio 3 aumentou ao longo da biossecagem, contudo teve uma queda acentuada entre o 22º e 24º dia de ensaio, esse período coincide com o período de maior redução mássica (Figura 5.10). A densidade do Ensaio 6 ao longo da biossecagem manteve-se próxima a $0,600 \text{ g.cm}^{-3}$. A densidade da matriz dos Ensaio 4, 5, 7 e 8 diminuíram ao longo do processo de biossecagem, nesses mesmos ensaios ocorreu remoção de umidade e valores de temperatura da matriz elevada. Os valores de densidade para a matriz final dos ensaios variam de 0,301 a $0,772 \text{ g.cm}^{-3}$, sendo que a faixa na literatura varia de 0,595 a $0,678 \text{ g.cm}^{-3}$.

Essa variação na estrutura da matriz também pode ser observada visualmente conforme é apresentado no Apêndice C as fotos da matriz inicial e final dos ensaios.

O Quadro 5.12 apresenta os valores médios do FAS da matriz durante os ensaios de biossecagem e a Figura 5.7 apresenta o respectivo gráfico.

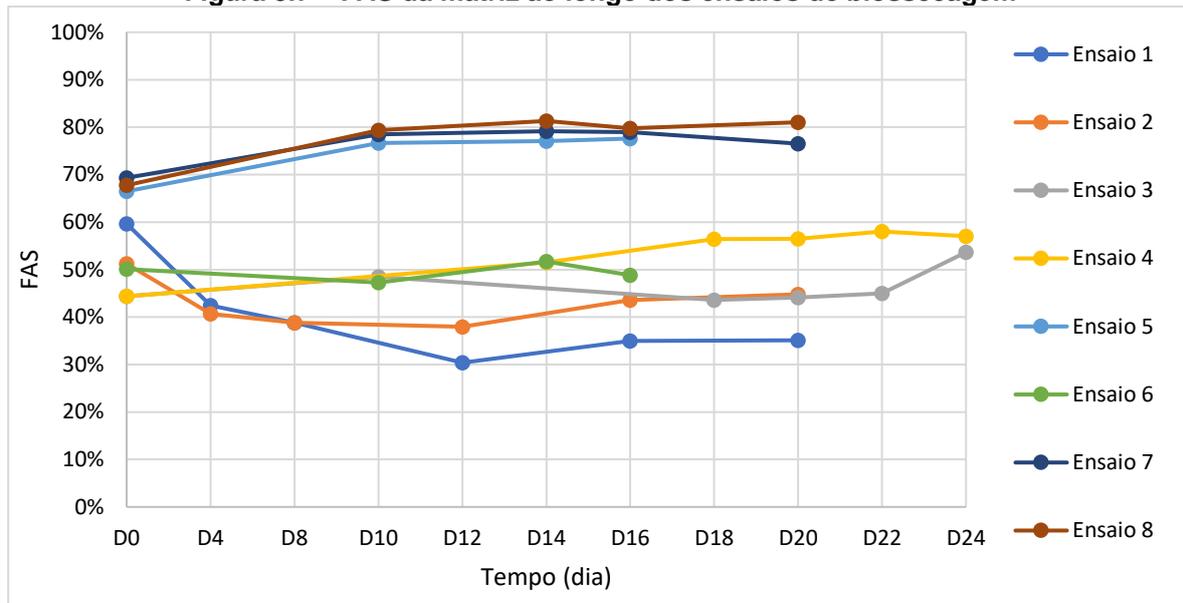
O valor do FAS para a matriz inicial das pesquisas na literatura variou de 50,4 a 69,7% e para a matriz final variou de 50,5 a 73,5%.

Quadro 5.12 – FAS, em %, da matriz durante os ensaios de biossecagem

| | Ensaio 1 | Ensaio 2 | Ensaio 3 | Ensaio 4 | Ensaio 5 | Ensaio 6 | Ensaio 7 | Ensaio 8 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| D0 | 59,65 | 51,22 | 44,36 | 44,36 | 66,50 | 50,10 | 69,33 | 67,78 |
| D4 | 42,44 | 40,66 | - | - | - | - | - | - |
| D8 | 38,83 | 38,82 | - | - | - | - | - | - |
| D10 | - | - | 48,47 | - | 76,69 | 47,26 | 78,48 | 79,35 |
| D12 | 30,39 | 37,96 | - | - | - | - | - | - |
| D14 | - | - | - | 51,54 | 77,10 | 51,70 | 79,15 | 81,31 |
| D16 | 34,95 | 43,56 | - | - | 77,60 | 48,86 | 78,98 | 79,73 |
| D18 | - | - | 43,61 | 56,42 | - | - | - | - |
| D20 | 35,08 | 44,76 | 44,14 | 56,52 | - | - | 76,53 | 81,02 |
| D22 | - | - | 44,97 | 58,03 | - | - | - | - |
| D24 | - | - | 53,66 | 57,02 | - | - | - | - |

Nota: 'D' refere-se a Dia.

Figura 5.7 – FAS da matriz ao longo dos ensaios de biossecagem



É possível observar que o FAS é inversamente proporcional à densidade, assim quanto menor os valores de densidade maior o valor do FAS, isto é, maior a quantidade de poros. O FAS também depende, em menor escala, do ST e SV. Assim a remoção de água aumenta o valor do FAS e a degradação da matéria orgânica faz com que a matriz colapse diminuindo o FAS. Dessa forma, as mudanças no valor do FAS dependem de qual desses dois fenômenos é predominante (ZHAO et al, 2011a).

Os Ensaios 1 e 2 iniciaram com FAS de 59,65 e 51,22%, respectivamente, contudo ao longo da biossecagem esses valores variaram, finalizando o ensaio com valores de FAS inferiores aos iniciais. Tal fato pode ser explicado pela compactação da matriz devido ao seu peso e/ou degradação da matéria orgânica que faz com que a matriz colapse. Contudo, a degradação da matéria orgânica foi baixa tendo em vista que a temperatura da matriz não atingiu valores elevados e houve pouca variação do ST e SV para o Ensaio 1, como pode ser observado na Figura 5.8.

Para os Ensaios 3 e 4, os valores de FAS da matriz final foram superiores em relação à matriz inicial. Ademais, os Ensaios 3 e 4 foram os únicos no qual o valor de FAS (44,36%) iniciou abaixo do valor adequado, que segundo Yang, Zhang e Jahng (2014) seria na faixa de 56 a 60%.

Os valores de FAS da matriz dos Ensaios 6 se mantiveram praticamente constante ao longo da biossecagem.

Para os Ensaio 5, 7 e 8 ocorreu um aumento dos valores de FAS, indicando que a influência da remoção de água da matriz foi superior à biodegradação de matéria orgânica.

Os valores de FAS da matriz final dos ensaios ficaram na faixa de 35,08 a 81,02%. Observa-se que a faixa de FAS da matriz final das pesquisas na literatura varia de 50,5 a 73,5%.

5.3.7. Balanço de Massa

O balanço de massa da biossecagem é composto pela massa (total, de U, de ST, de SV e de SF) presentes na matriz e removida e/ou consumida durante o processo, conforme apresentado no item 4.5 e na Figura 4.11.

Os gráficos apresentados nas Figura 5.8 a Figura 5.15 contêm informações referentes a redução mássica, a massa de U, de ST, de SV e de SF da matriz, assim como os valores de temperatura, da taxa de aeração e os dias nos quais foram realizados revolvimentos para os Ensaio 1 a 8, respectivamente.

É importante ressaltar que a massa total, em kg, apresentada nesses gráficos corresponde à massa total sem ajuste, isto é, a massa da matriz considerando a retirada de amostras e perdas de massa durante os revolvimentos, por isso há quedas bruscas nos dias em que ocorreram o revolvimento da matriz.

Por outro lado, os valores de massa de U, de ST, de SV e de SF, em kg, foram calculados e apresentados com ajustes, ou seja, desconsiderando a remoção de amostras e as perdas de massa durante os revolvimentos, por isso não há quedas bruscas.

Os Quadro 5.13 a Quadro 5.20 apresentam o balanço de massa durante a biossecagem nos Ensaio 1 a 8, respectivamente. Todos os valores de massa apresentados nos quadros foram calculados com ajustes, desconsiderando a remoção de amostras e as perdas de massa durante os revolvimentos.

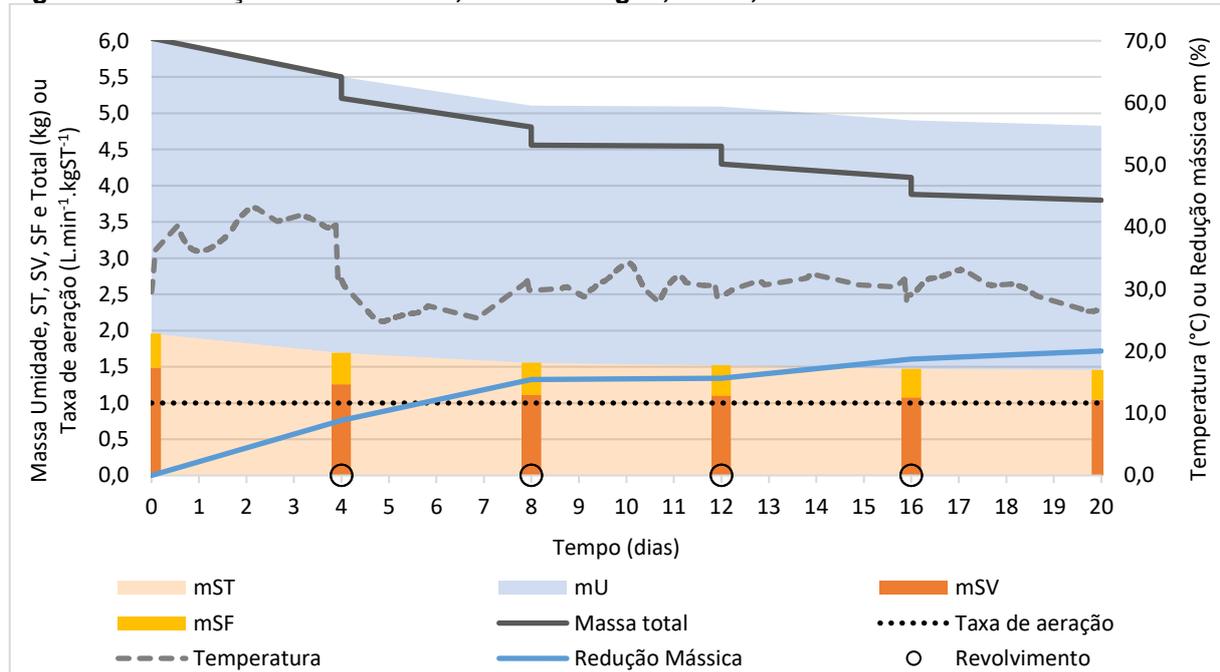
Cabe ressaltar que valores negativos da massa relativa à umidade podem ocorrer devido à geração de água durante a degradação da matéria orgânica pelos microrganismos. Por outro lado, valores negativos da massa relativa aos SF podem ocorrer devido à heterogeneidade intrínseca dos resíduos sólidos e à amostragem representativa de uma amostra sólida (AKUTSU et al., 2019).

Quadro 5.13 – Balanço de massa durante a biossecagem do Ensaio 1

| Dia | Massa total (kg) | | mU (kg) | | mST (kg) | | mSV (kg) | | mSF (kg) | |
|--------------|------------------|-------------|---------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
| | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida |
| 0 | 6,04 | 0,00 | 4,08 | 0,00 | 1,96 | 0,00 | 1,49 | 0,00 | 0,47 | 0,00 |
| 4 | 5,50 | 0,53 | 3,81 | 0,27 | 1,69 | 0,27 | 1,26 | 0,23 | 0,43 | 0,04 |
| 8 | 5,10 | 0,40 | 3,55 | 0,26 | 1,55 | 0,14 | 1,11 | 0,15 | 0,44 | -0,01 |
| 12 | 5,09 | 0,01 | 3,58 | -0,02 | 1,52 | 0,03 | 1,10 | 0,01 | 0,42 | 0,03 |
| 16 | 4,90 | 0,19 | 3,43 | 0,14 | 1,47 | 0,05 | 1,08 | 0,02 | 0,39 | 0,02 |
| 20 | 4,83 | 0,08 | 3,37 | 0,06 | 1,46 | 0,01 | 1,05 | 0,03 | 0,41 | -0,02 |
| TOTAL | - | 1,21 | - | 0,71 | - | 0,50 | - | 0,44 | - | 0,06 |

Nota: mU: massa em kg relativa à U da matriz. mST: massa em kg relativa aos ST da matriz. mSV: massa em kg relativa aos SV da matriz. mSF: massa em kg relativa aos SF da matriz.

Figura 5.8 – Redução mássica total, massa de água, de ST, de SV e de SF da matriz do Ensaio 1



Nota: mST: massa em kg relativa aos ST da matriz. mU: massa em kg relativa à U da matriz. mSV: massa em kg relativa aos SV da matriz. mSF: massa em kg relativa aos SF da matriz.

A redução mássica total do Ensaio 1 foi de 20,05% nos 20 dias de ensaio, sendo que no 8º dia a redução mássica já era de 15,44%, correspondendo a 77% da redução mássica total.

Da massa total removida (1,21 kg), 58% foi de água (0,71 kg) e 42% de sólidos (0,50 kg). Já em relação aos sólidos removidos, 87% corresponderam a SV e 13% SF.

Quadro 5.14 – Balanço de massa durante a biossecagem do Ensaio 2

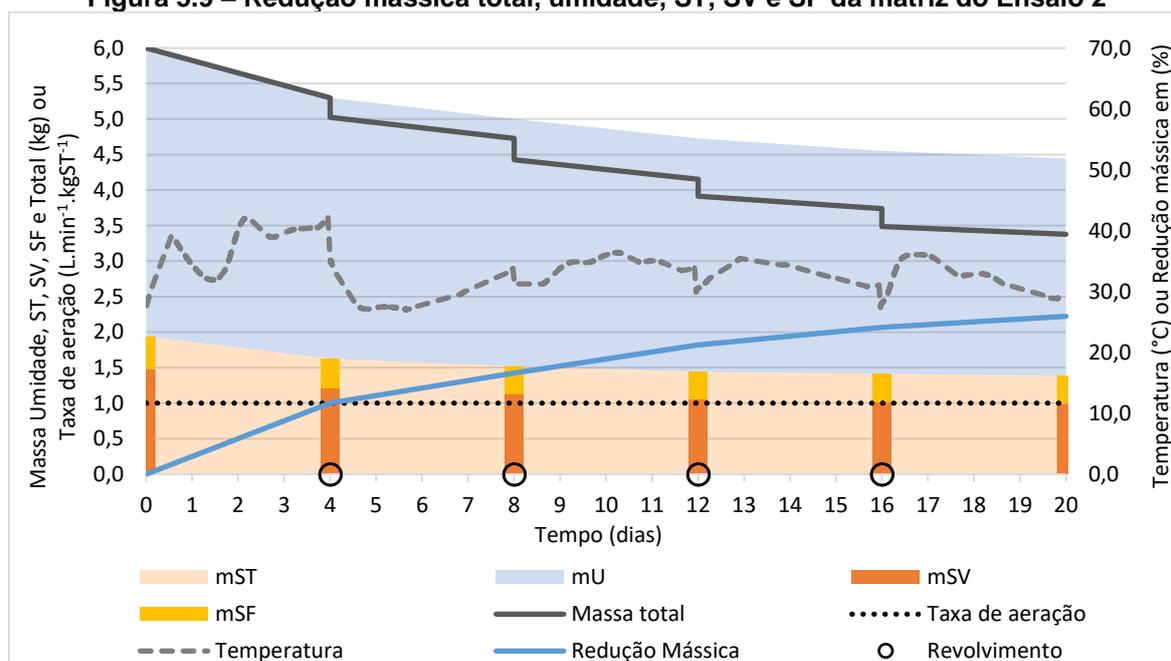
| Dia | Massa total (kg) | | mU (kg) | | mST (kg) | | mSV (kg) | | mSF (kg) | |
|--------------|------------------|-------------|---------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
| | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida |
| 0 | 6,00 | 0,00 | 4,06 | 0,00 | 1,94 | 0,00 | 1,48 | 0,00 | 0,46 | 0,00 |
| 4 | 5,30 | 0,70 | 3,67 | 0,39 | 1,63 | 0,31 | 1,21 | 0,27 | 0,41 | 0,05 |
| 8 | 5,00 | 0,30 | 3,48 | 0,19 | 1,52 | 0,11 | 1,13 | 0,08 | 0,39 | 0,03 |
| 12 | 4,73 | 0,28 | 3,28 | 0,20 | 1,44 | 0,08 | 1,06 | 0,08 | 0,38 | 0,00 |
| 16 | 4,55 | 0,17 | 3,14 | 0,15 | 1,41 | 0,03 | 1,01 | 0,04 | 0,40 | -0,02 |
| 20 | 4,44 | 0,11 | 3,06 | 0,08 | 1,39 | 0,03 | 0,99 | 0,02 | 0,40 | 0,01 |
| TOTAL | - | 1,56 | - | 1,00 | - | 0,55 | - | 0,49 | - | 0,07 |

Nota: mU: massa em kg relativa à U da matriz. mST: massa em kg relativa aos ST da matriz. mSV: massa em kg relativa aos SV da matriz. mSF: massa em kg relativa aos SF da matriz.

A redução mássica total do Ensaio 2 foi de 25,93% nos 20 dias de ensaio. No 12º dia a redução mássica atingiu 21,23%, correspondendo a 82% da redução mássica total.

Da massa total removida (1,26 kg), 64% foi de água (1,00 kg) e 36% de sólidos (0,55 kg). Em relação aos sólidos removidos, 88% foram SV e 12% SF.

Figura 5.9 – Redução mássica total, umidade, ST, SV e SF da matriz do Ensaio 2



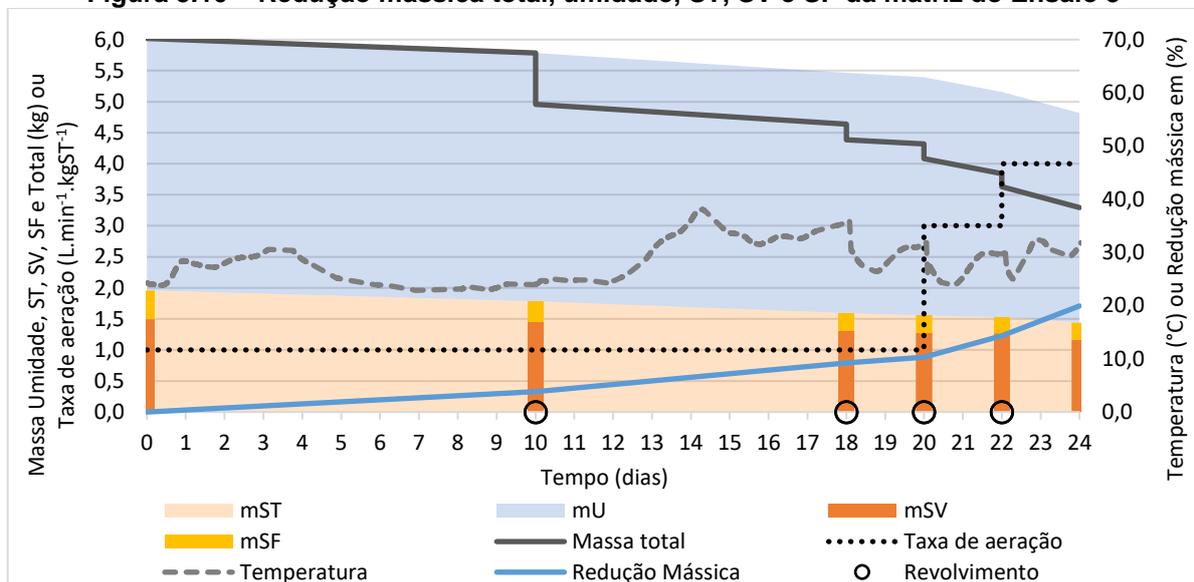
Nota: mST: massa em kg relativa aos ST da matriz. mU: massa em kg relativa à U da matriz. mSV: massa em kg relativa aos SV da matriz. mSF: massa em kg relativa aos SF da matriz.

Quadro 5.15 – Balanço de massa durante a biossecagem do Ensaio 3

| Dia | Massa total (kg) | | mU (kg) | | mST (kg) | | mSV (kg) | | mSF (kg) | |
|--------------|------------------|-------------|---------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
| | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida |
| 0 | 6,00 | 0,00 | 4,06 | 0,00 | 1,96 | 0,00 | 1,50 | 0,00 | 0,46 | 0,00 |
| 10 | 5,79 | 0,23 | 4,00 | 0,06 | 1,78 | 0,18 | 1,45 | 0,05 | 0,33 | 0,13 |
| 18 | 5,46 | 0,32 | 3,87 | 0,13 | 1,59 | 0,19 | 1,31 | 0,14 | 0,28 | 0,05 |
| 20 | 5,40 | 0,07 | 3,84 | 0,03 | 1,56 | 0,04 | 1,28 | 0,03 | 0,28 | 0,01 |
| 22 | 5,16 | 0,24 | 3,63 | 0,21 | 1,53 | 0,03 | 1,27 | 0,01 | 0,26 | 0,02 |
| 24 | 4,82 | 0,34 | 3,38 | 0,25 | 1,44 | 0,08 | 1,16 | 0,11 | 0,28 | -0,02 |
| TOTAL | - | 1,20 | - | 0,68 | - | 0,52 | - | 0,33 | - | 0,18 |

Nota: mU: massa em kg relativa à U da matriz. mST: massa em kg relativa aos ST da matriz. mSV: massa em kg relativa aos SV da matriz. mSF: massa em kg relativa aos SF da matriz.

Figura 5.10 – Redução mássica total, umidade, ST, SV e SF da matriz do Ensaio 3



Nota: mST: massa em kg relativa aos ST da matriz. mU: massa em kg relativa à U da matriz. mSV: massa em kg relativa aos SV da matriz. mSF: massa em kg relativa aos SF da matriz.

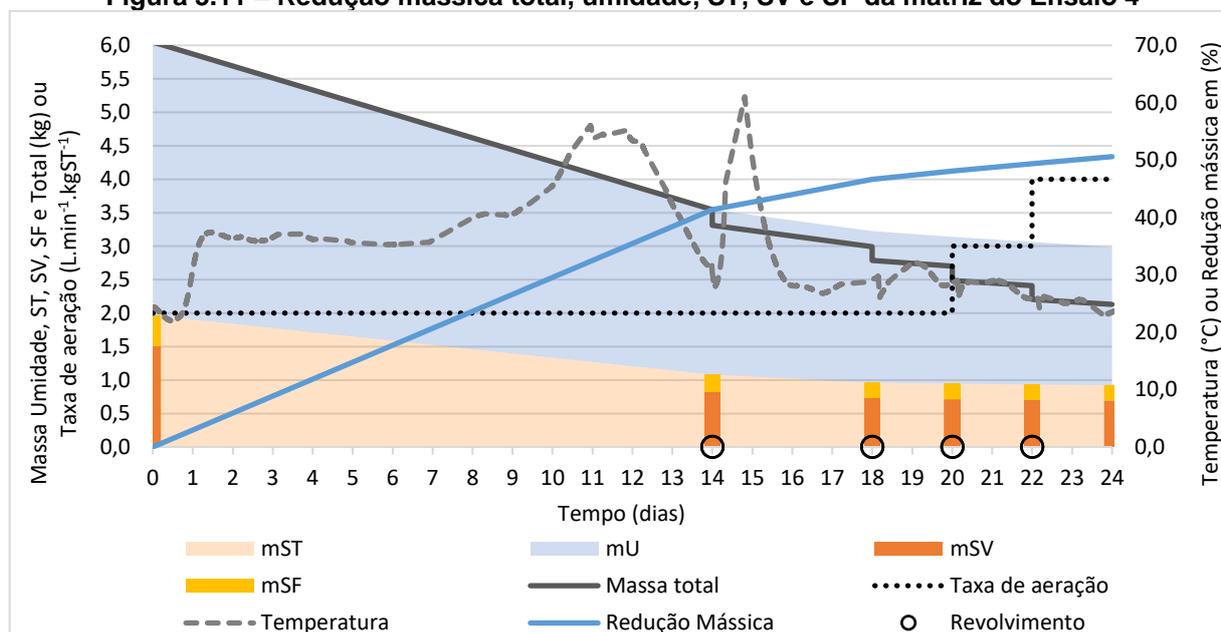
A redução mássica total do Ensaio 3 foi de 19,94% nos 24 dias de ensaio, sendo que 48% da massa total foi removida nos últimos 4 dias de ensaio quando ocorreu o aumento da taxa de aeração para 3,0 e depois para 4,0 L.min⁻¹.kgST⁻¹. Observa-se, portanto, que a aeração forçada é um fator determinante para a remoção de massa da matriz e que a taxa de 1 L.min⁻¹.kgST⁻¹ foi insuficiente tanto para as atividades microbianas quanto para a remoção da massa da matriz.

Quadro 5.16 – Balanço de massa durante a biossecagem do Ensaio 4

| Dia | Massa total (kg) | | mU (kg) | | mST (kg) | | mSV (kg) | | mSF (kg) | |
|--------------|------------------|-------------|---------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
| | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida |
| 0 | 6,05 | 0,00 | 4,08 | 0,00 | 1,97 | 0,00 | 1,51 | 0,00 | 0,46 | 0,00 |
| 14 | 3,55 | 2,50 | 2,47 | 1,62 | 1,08 | 0,89 | 0,83 | 0,68 | 0,25 | 0,21 |
| 18 | 3,23 | 0,32 | 2,27 | 0,20 | 0,96 | 0,12 | 0,73 | 0,09 | 0,23 | 0,03 |
| 20 | 3,14 | 0,09 | 2,19 | 0,07 | 0,95 | 0,01 | 0,71 | 0,02 | 0,24 | -0,01 |
| 22 | 3,06 | 0,08 | 2,13 | 0,06 | 0,93 | 0,01 | 0,70 | 0,01 | 0,23 | 0,01 |
| 24 | 2,99 | 0,07 | 2,06 | 0,07 | 0,93 | 0,01 | 0,69 | 0,01 | 0,23 | 0,00 |
| TOTAL | - | 3,06 | - | 2,02 | - | 1,04 | - | 0,81 | - | 0,23 |

Nota: mU: massa em kg relativa à U da matriz. mST: massa em kg relativa aos ST da matriz. mSV: massa em kg relativa aos SV da matriz. mSF: massa em kg relativa aos SF da matriz.

Figura 5.11 – Redução mássica total, umidade, ST, SV e SF da matriz do Ensaio 4



Nota: mST: massa em kg relativa aos ST da matriz. mU: massa em kg relativa à U da matriz. mSV: massa em kg relativa aos SV da matriz. mSF: massa em kg relativa aos SF da matriz.

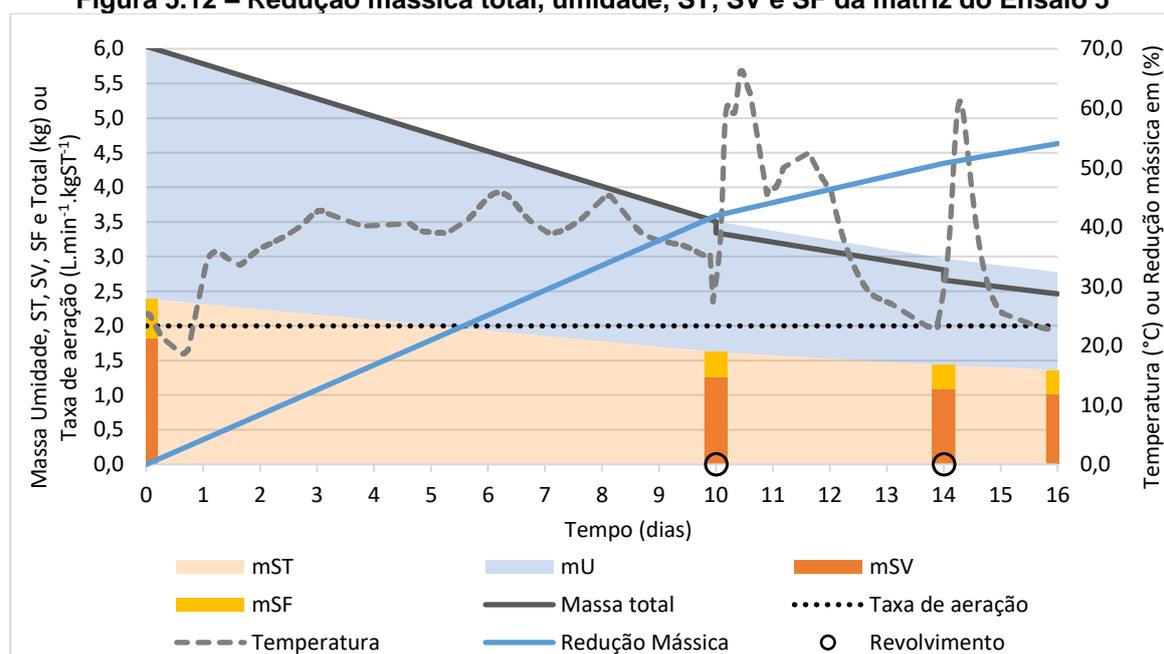
A redução mássica total do Ensaio 4 foi de 50,61% nos 24 dias de ensaio. A massa removida até o 14º dia de ensaio foi de 82% em relação a remoção total. Observa-se que nos 4 últimos dias de ensaio ocorreu o aumento da taxa de ar e, nesse mesmo período, ocorreu a redução mássica de apenas 5% em relação a massa total. Portanto, para o Ensaio 4, o aumento da taxa de ar não favoreceu a redução mássica. Outro ponto importante é que aos 14 dias de ensaio já se atingiu 82% da redução mássica total, que foi da ordem de 50%, otimizando o tempo de ensaio.

Quadro 5.17 – Balanço de massa durante a biossecagem do Ensaio 5

| Dia | Massa total (kg) | | mU (kg) | | mST (kg) | | mSV (kg) | | mSF (kg) | |
|--------------|------------------|-------------|---------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
| | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida |
| 0 | 6,04 | 0,00 | 3,64 | 0,00 | 2,39 | 0,00 | 1,82 | 0,00 | 0,57 | 0,00 |
| 10 | 3,51 | 2,53 | 1,89 | 1,76 | 1,62 | 0,77 | 1,26 | 0,56 | 0,36 | 0,21 |
| 14 | 2,97 | 0,53 | 1,54 | 0,35 | 1,44 | 0,19 | 1,09 | 0,17 | 0,35 | 0,01 |
| 16 | 2,77 | 0,20 | 1,41 | 0,13 | 1,36 | 0,07 | 1,01 | 0,07 | 0,35 | 0,00 |
| TOTAL | - | 3,26 | - | 2,23 | - | 1,03 | - | 0,81 | - | 0,22 |

Nota: mU: massa em kg relativa à U da matriz. mST: massa em kg relativa aos ST da matriz. mSV: massa em kg relativa aos SV da matriz. mSF: massa em kg relativa aos SF da matriz.

Figura 5.12 – Redução mássica total, umidade, ST, SV e SF da matriz do Ensaio 5



Nota: mST: massa em kg relativa aos ST da matriz. mU: massa em kg relativa à U da matriz. mSV: massa em kg relativa aos SV da matriz. mSF: massa em kg relativa aos SF da matriz.

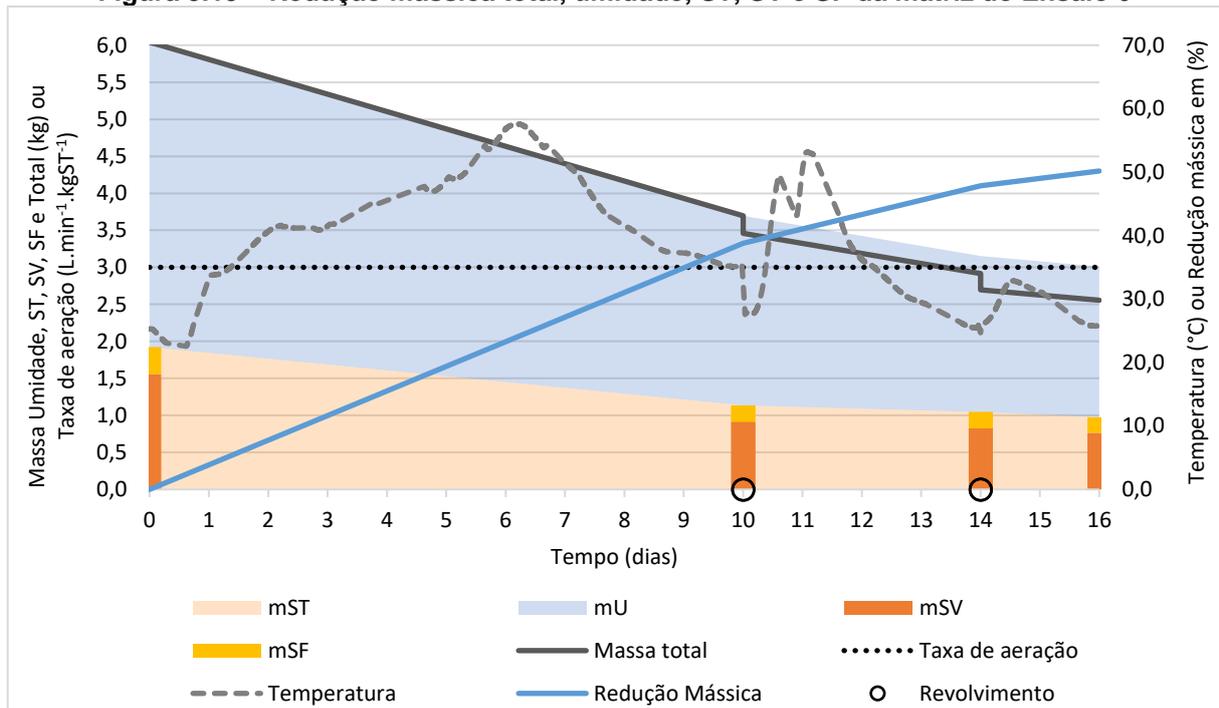
A redução mássica total do Ensaio 5 foi de 54,04% nos 16 dias de ensaio, de 41,88% no 10º dia e de 50,73% no 14º dia. No 10º dia de ensaio ocorreu a remoção mássica de 77% do valor total e no 14º dia a remoção mássica foi de 94% do valor total.

Quadro 5.18 – Balanço de massa durante a biossecagem do Ensaio 6

| Dia | Massa total (kg) | | mU (kg) | | mST (kg) | | mSV (kg) | | mSF (kg) | |
|--------------|------------------|-------------|---------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
| | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida |
| 0 | 6,04 | 0,00 | 4,12 | 0,00 | 1,92 | 0,00 | 1,56 | 0,00 | 0,37 | 0,00 |
| 10 | 3,70 | 2,34 | 2,56 | 1,55 | 1,14 | 0,79 | 0,92 | 0,64 | 0,22 | 0,15 |
| 14 | 3,15 | 0,55 | 2,11 | 0,46 | 1,04 | 0,09 | 0,82 | 0,09 | 0,22 | 0,00 |
| 16 | 3,01 | 0,14 | 2,03 | 0,07 | 0,98 | 0,07 | 0,76 | 0,06 | 0,21 | 0,01 |
| TOTAL | - | 3,03 | - | 2,08 | - | 0,95 | - | 0,79 | - | 0,15 |

Nota: mU: massa em kg relativa à U da matriz. mST: massa em kg relativa aos ST da matriz. mSV: massa em kg relativa aos SV da matriz. mSF: massa em kg relativa aos SF da matriz.

Figura 5.13 – Redução mássica total, umidade, ST, SV e SF da matriz do Ensaio 6



Nota: mST: massa em kg relativa aos ST da matriz. mU: massa em kg relativa à U da matriz. mSV: massa em kg relativa aos SV da matriz. mSF: massa em kg relativa aos SF da matriz.

A redução mássica total do Ensaio 6 foi de 50,18% nos 16 dias de ensaio, de 38,80% no 10º dia e de 47,83% no 14º dia. No 10º dia de ensaio ocorreu a remoção mássica de 77% do valor total e no 14º dia a remoção mássica foi de 95% do valor total.

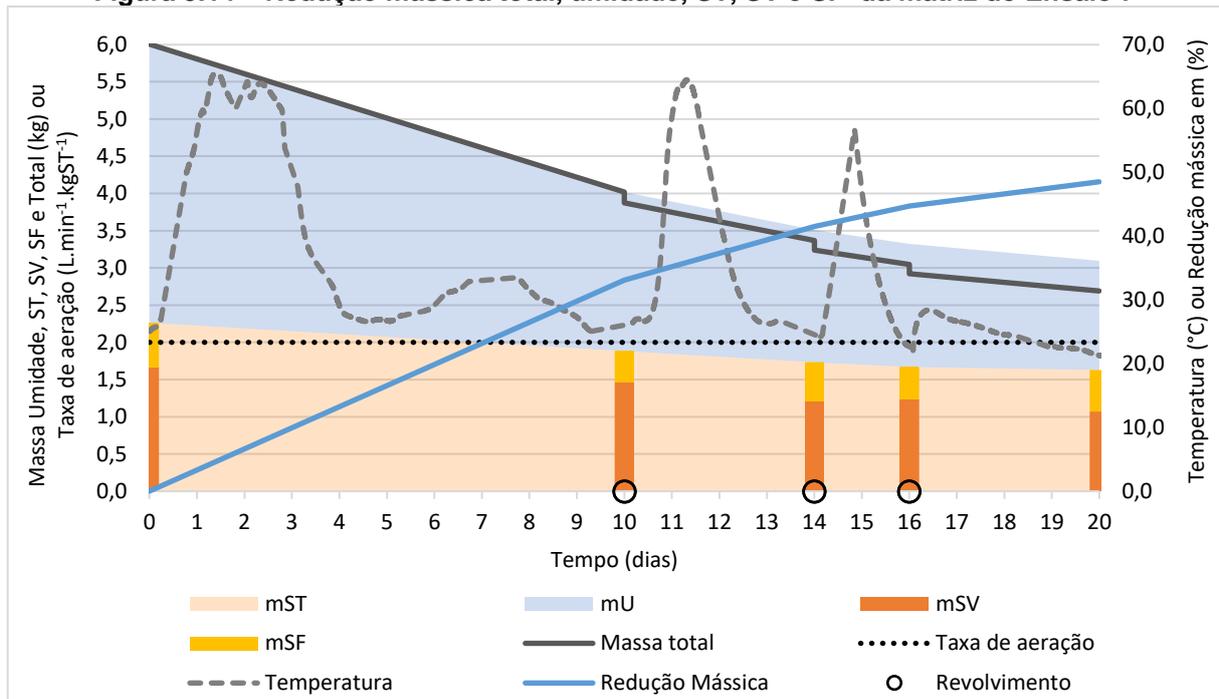
Quadro 5.19 – Balanço de massa durante a biossecagem do Ensaio 7

| Dia | Massa total (kg) | | mU (kg) | | mST (kg) | | mSV (kg) | | mSF (kg) | |
|--------------|------------------|-------------|---------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
| | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida |
| 0 | 6,00 | 0,00 | 3,74 | 0,00 | 2,26 | 0,00 | 1,66 | 0,00 | 0,60 | 0,00 |
| 10 | 4,02 | 1,99 | 2,14 | 1,61 | 1,88 | 0,38 | 1,46 | 0,20 | 0,42 | 0,18 |
| 14 | 3,51 | 0,51 | 1,78 | 0,35 | 1,73 | 0,15 | 1,21 | 0,25 | 0,52 | -0,10 |
| 16 | 3,32 | 0,19 | 1,65 | 0,13 | 1,67 | 0,06 | 1,23 | -0,03 | 0,43 | 0,09 |
| 20 | 3,09 | 0,23 | 1,46 | 0,19 | 1,63 | 0,04 | 1,07 | 0,16 | 0,56 | -0,12 |
| TOTAL | - | 2,91 | - | 2,28 | - | 0,63 | - | 0,59 | - | 0,04 |

Nota: mU: massa em kg relativa à U da matriz. mST: massa em kg relativa aos ST da matriz. mSV: massa em kg relativa aos SV da matriz. mSF: massa em kg relativa aos SF da matriz.

A redução mássica total do Ensaio 7 foi de 48,47% nos 20 dias de ensaio, de 33,08% no 10º dia e de 41,51% no 14º dia. No 10º dia de ensaio ocorreu a remoção mássica de 68% do valor total e no 14º dia a remoção mássica foi de 86% do valor total.

Figura 5.14 – Redução mássica total, umidade, ST, SV e SF da matriz do Ensaio 7



Nota: mST: massa em kg relativa aos ST da matriz. mU: massa em kg relativa à U da matriz. mSV: massa em kg relativa aos SV da matriz. mSF: massa em kg relativa aos SF da matriz.

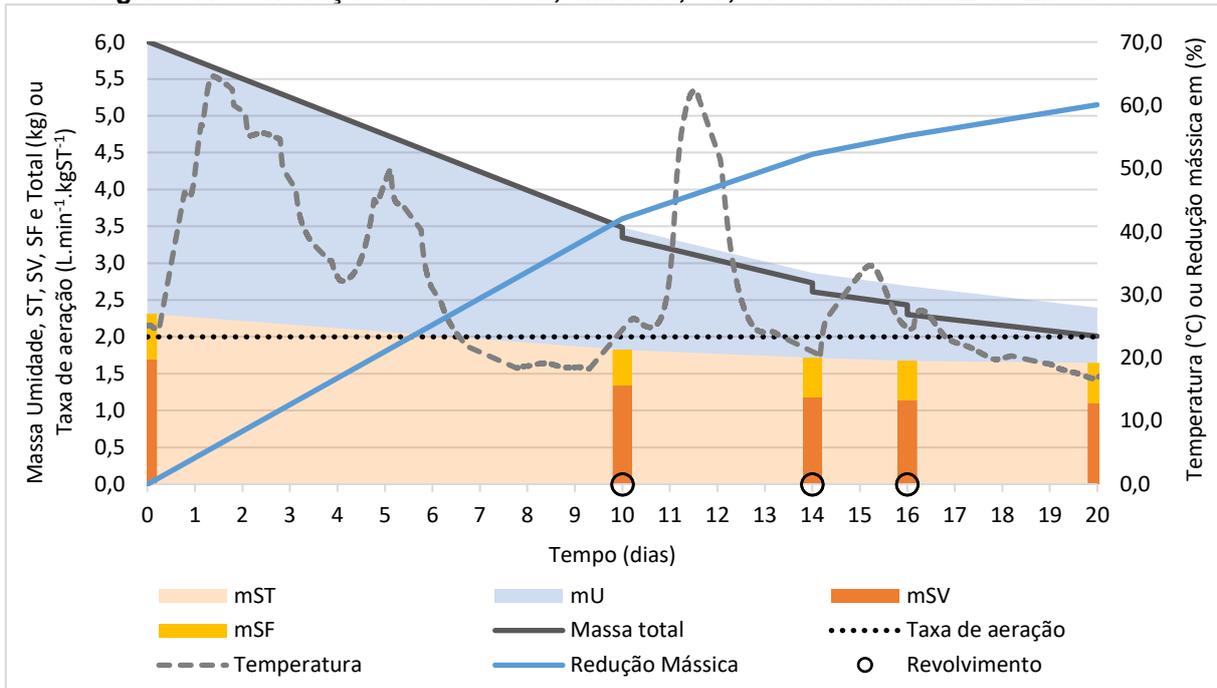
Quadro 5.20 – Balanço de massa durante a biossecagem do Ensaio 8

| Dia | Massa total (kg) | | mU (kg) | | mST (kg) | | mSV (kg) | | mSF (kg) | |
|--------------|------------------|-------------|---------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
| | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida | Matriz | Remo-vida |
| 0 | 6,01 | 0,00 | 3,69 | 0,00 | 2,31 | 0,00 | 1,70 | 0,00 | 0,62 | 0,00 |
| 10 | 3,48 | 2,52 | 1,66 | 2,03 | 1,83 | 0,49 | 1,34 | 0,36 | 0,48 | 0,13 |
| 14 | 2,87 | 0,61 | 1,15 | 0,50 | 1,72 | 0,11 | 1,18 | 0,16 | 0,54 | -0,05 |
| 16 | 2,69 | 0,18 | 1,02 | 0,14 | 1,67 | 0,04 | 1,14 | 0,04 | 0,53 | 0,01 |
| 20 | 2,40 | 0,29 | 0,75 | 0,27 | 1,65 | 0,03 | 1,10 | 0,04 | 0,55 | -0,02 |
| TOTAL | - | 3,61 | - | 2,94 | - | 0,67 | - | 0,60 | - | 0,07 |

Nota: mU: massa em kg relativa à U da matriz. mST: massa em kg relativa aos ST da matriz. mSV: massa em kg relativa aos SV da matriz. mSF: massa em kg relativa aos SF da matriz.

A redução mássica total do Ensaio 8 foi de 60,09% nos 20 dias de ensaio, de 42,02% no 10º dia e de 52,23% no 14º dia. No 10º dia de ensaio ocorreu a remoção mássica de 70% do valor total e no 14º dia a remoção mássica foi de 87% do valor total.

Figura 5.15 – Redução mássica total, umidade, ST, SV e SF da matriz do Ensaio 8



Nota: mST: massa em kg relativa aos ST da matriz. mU: massa em kg relativa à U da matriz. mSV: massa em kg relativa aos SV da matriz. mSF: massa em kg relativa aos SF da matriz.

5.3.8. Remoção de Umidade e Troca de Calor

O Quadro 5.21 apresenta os valores globais da água gerada pelo metabolismo microbiano, da energia gerada pelas reações biológicas, do calor sensível consumido pela água e do calor sensível consumido pelos sólidos secos para todos os ensaios realizados.

Quadro 5.21 – Valores globais da água gerada pelo metabolismo microbiano, da energia gerada pelas reações biológicas, do calor sensível consumido pela água e do calor sensível consumido pelos sólidos secos dos ensaios de biossecagem

| Ensaio | $M_{\text{água,metab}}$ (kg) | Q_{bio} (kJ) | $Q_{\text{água}}$ (kJ) | $Q_{\text{sólido}}$ (kJ) |
|--------|------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| 1 | 0,18 | 9.219,36 | 194,59 | 22,89 |
| 2 | 0,20 | 10.256,65 | 299,32 | 34,26 |
| 3 | 0,14 | 7.012,89 | 333,71 | 35,64 |
| 4 | 0,33 | 17.023,51 | 219,41 | 26,77 |
| 5 | 0,33 | 16.996,07 | 156,43 | 20,96 |
| 6 | 0,33 | 16.672,69 | 228,78 | 26,06 |
| 7 | 0,24 | 12.417,31 | 67,27 | -1,62 |
| 8 | 0,25 | 12.552,78 | 8,31 | -27,84 |

Nota: $M_{\text{água,metab}}$: massa de água gerada pelo metabolismo microbiano; Q_{bio} : energia gerada pelas reações biológicas, isto é, calor gerado pela degradação dos SV; $Q_{\text{água}}$: calor sensível consumido pela água; $Q_{\text{sólido}}$: calor sensível consumido pelos sólidos secos.

O Quadro 5.22 apresenta os valores globais da energia gerada pelas reações biológicas, do calor sensível consumido pela água e do calor sensível consumido pelos sólidos secos, assim como a variação presente na literatura.

Quadro 5.22 – Valores da energia gerada pelas reações biológicas, do calor sensível consumido pela água e do calor sensível consumido pelos sólidos secos das pesquisas de biossecagem

| Pesquisa | Q_{bio} (kJ) | Q_{água} (kJ) | Q_{sólido} (kJ) |
|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Zhao et al. (2010), | 35.700 a 41.800 | 5.060 a 13.800 | 657 a 1.840 |
| Huiliñir e Villegas (2015) | 683 a 5.312 | 13 a 449 | 1 a 115 |
| Hao, Yang e Jahng (2018) | 16.033 a 21.582 | 1.776 a 2.299 | 198 a 394 |
| Variação literatura | 683 a 41.800 | 13 a 13.800 | 1 a 1.840 |

Nota: Q_{bio}: energia gerada pelas reações biológicas, isto é, calor gerado pela degradação dos SV; Q_{água}: calor sensível consumido pela água; Q_{sólido}: calor sensível consumido pelos sólidos secos.

Observa-se que os valores da energia gerada pelas reações biológicas, do calor sensível consumido pela água e do calor sensível consumido pelos sólidos secos dos Ensaio 1 a 6 estão dentro da variação apresentada na literatura, visto que a variação é bem ampla.

Os valores globais do calor sensível consumido pelos sólidos secos dos Ensaio 7 e 8 estão abaixo do valor reportado na literatura e o mesmo ocorre com o valor global do calor sensível consumido pela água do Ensaio 8 (8,27 kJ).

É importante ressaltar que os valores globais do calor sensível consumido pelos sólidos secos dos Ensaio 7 e 8 são negativos, demonstrando que foi transferida energia dos sólidos para o meio, diferentemente dos valores apresentados na literatura que são positivos.

É importante ressaltar a necessidade das futuras pesquisas de biossecagem do lodo de esgoto calcularem e analisarem todas as formas de consumo e dissipação de energia.

5.3.9. Índice de Biossecagem

Os Quadro 5.23, Quadro 5.24, Quadro 5.25, Quadro 5.26 e Quadro 5.27 apresentam os valores do Índice de Biossecagem, global e para os intervalos entre os revolvimentos, para os Ensaio 1 a 8.

Quadro 5.23 – Índice de Biossecagem dos Ensaio 1 e 2

| Intervalo | Ensaio 1 | Ensaio 2 |
|------------------|-----------------|-----------------|
| D0 - D4 | 1,16 | 1,45 |
| D4 - D8 | 1,75 | 2,43 |
| D8 - D12 | - | 2,53 |
| D12 - D16 | 5,88 | 3,26 |
| D16 - D20 | 2,11 | 4,03 |
| Global | 1,61 | 2,05 |

Nota: 'D' refere-se a Dia.

Quadro 5.24 – Índice de Biossecagem dos Ensaio 3

| Intervalo | Ensaio 3 |
|---------------|-------------|
| D0 - D10 | 1,23 |
| D10 - D18 | 0,93 |
| D18 - D20 | 1,15 |
| D20 - D22 | 19,09 |
| D22 - D24 | 2,41 |
| Global | 2,05 |

Nota: 'D' refere-se a Dia.

Quadro 5.25 – Índice de Biossecagem dos Ensaio 4

| Intervalo | Ensaio 4 |
|---------------|-------------|
| D0 - D14 | 2,38 |
| D14 - D18 | 2,13 |
| D18 - D20 | 3,43 |
| D20 - D22 | 6,72 |
| D22 - D24 | 9,22 |
| Global | 2,49 |

Nota: 'D' refere-se a Dia.

Quadro 5.26 – Índice de Biossecagem dos Ensaio 5 e 6

| Intervalo | Ensaio 5 | Ensaio 6 |
|---------------|-------------|-------------|
| D0 - D10 | 3,13 | 2,43 |
| D10 - D14 | 2,02 | 4,91 |
| D14 - D16 | 1,69 | 1,21 |
| Global | 2,76 | 2,62 |

Nota: 'D' refere-se a Dia.

Quadro 5.27 – Índice de Biossecagem dos Ensaio 7 e 8

| Intervalo | Ensaio 7 | Ensaio 8 |
|---------------|-------------|-------------|
| D0 - D10 | 7,90 | 5,73 |
| D10 - D14 | 1,39 | 3,14 |
| D14 - D16 | - | 3,44 |
| D16 - D20 | 1,20 | 6,26 |
| Global | 3,85 | 4,92 |

Nota: 'D' refere-se a Dia.

Observa-se que os três maiores valores de BI são referentes aos Ensaio 5, 7 e 8, respectivamente, demonstrando que nesses ensaios ocorreu as maiores remoções de água com os menores consumos de SV.

Os valores de BI globais para os Ensaio 1, 2 e 3 não se encontram na faixa apresentada na literatura que é 2,4 a 17,3.

5.4. ANÁLISE GLOBAL DA BIOSSECAGEM NOS ENSAIOS

Além de analisar os ensaios realizados individualmente, é importante compará-los entre si e com outros ensaios da literatura para maior entendimento do processo como um todo.

No Brasil, três estudos sobre biossecagem do lodo de esgoto foram realizados por Lucatti et al. (2017), Reis (2017) e Almeida et al. (2019). Os dois primeiros estudos

utilizaram em seus ensaios lodo anaeróbio desaguado em leito de drenagem, isto é, sem adição de polímero. Já o estudo realizado por Almeida et al. (2019) utilizou lodo anaeróbio seguido de físico-químico e desaguado em centrífuga com adição de polímero. Nenhum dos ensaios realizados por esses autores atingiram temperaturas superiores a 40°C. Por outro lado, na literatura internacional, outros tipos de lodo já foram utilizados em pesquisas como lodo anaeróbio/anóxico/aeróbio desaguado em centrífuga e lodo secundário com e sem digestão (WINKLER et al., 2013; REIS, 2017), sendo que as temperaturas nesses ensaios atingiram a fase termofílica.

Comparando esses ensaios da literatura com os ensaios realizados nesse trabalho, observa-se que a temperatura da matriz pode atingir a fase termofílica para diferentes tipos de lodo utilizado na preparação da matriz inicial, sendo que os procedimentos operacionais (taxa de aeração e revolvimento) e as outras características da matriz (proporção mássica e umidade) são fatores essenciais para um que o processo funcione adequadamente.

5.4.1. Taxa de aeração

Para analisar o efeito de diferentes taxas de aeração, comparou-se os Ensaios 3, 4 e 6 (Figura 5.16 e Figura 5.17), pois eles possuem a mesma umidade inicial da matriz (aproximadamente 68%) e a mesma proporção mássica de 0:1:8 (lodo:serragem:ração).

A taxa de aeração utilizada nos Ensaios 3, 4 e 6 foi de 1, 2 e 3 L.min⁻¹.kgST⁻¹, respectivamente. Contudo, a taxa de aeração dos ensaios 3 e 4 foi aumentada no 20º dia e no 22º dia para 3 e 4 L.min⁻¹.kgST⁻¹, respectivamente, conforme apresentado na Figura 5.17.

A temperatura máxima da matriz dos Ensaios 3, 4 e 6 foi de 38,06, 61,06 e 57,56°C, respectivamente. A redução mássica foi de 19,94% em 24 dias, 50,61% em 24 dias e 50,18% em 16 dias para os Ensaios 3, 4 e 5. E a umidade da matriz dos Ensaios 3, 4 e 6 variou muito pouco de 67,49% para 70,09%, de 67,49% para 68,74% e de 68,15 para 67,48%, respectivamente.

Observa-se que, em relação a umidade da matriz, não houve grandes variações entre os Ensaios 3, 4 e 6, sendo que nenhum desses ensaios atingiram o valor máximo de umidade – 43% segundo Gyllenhammer (1998) apud Reis (2017) e Zhao et al. (1999) apud Reis (2017) ou 55% segundo Kudra et al. (2002) apud Reis et al. (2019) – para a utilização da matriz para geração de energia por meio de processo de combustão.

Figura 5.16 – Temperatura, ST e massa total da matriz dos Ensaios 3, 4 e 6

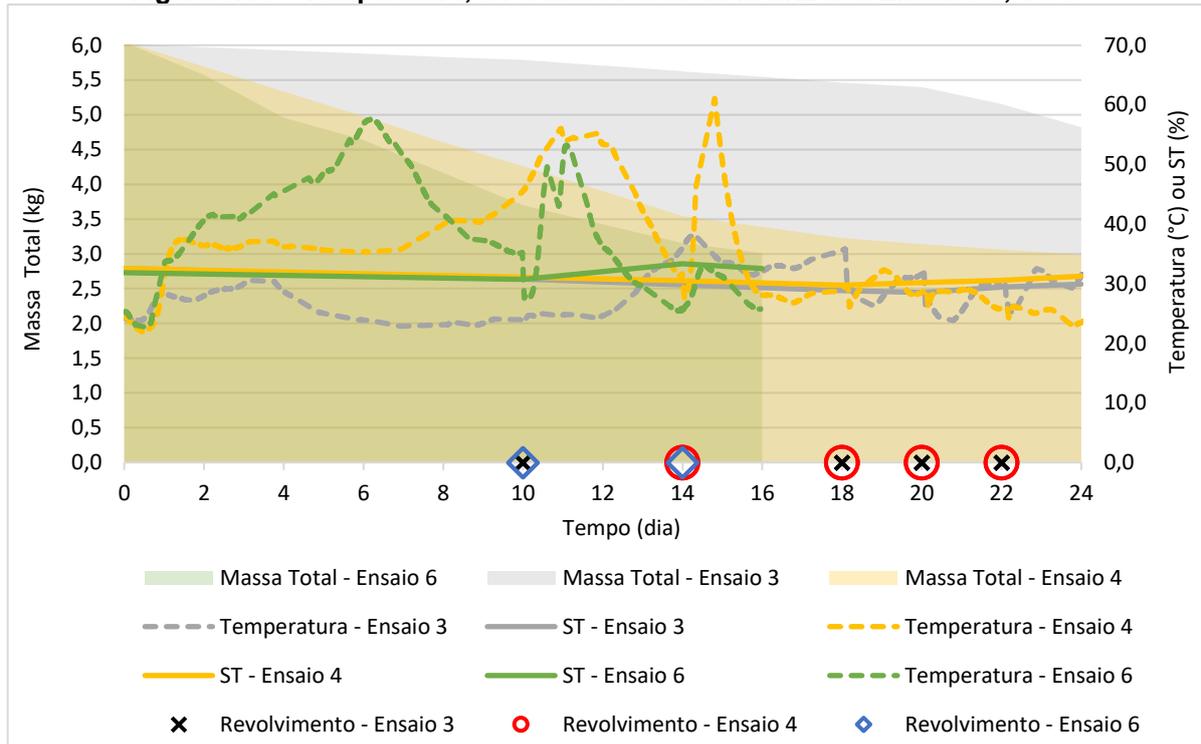
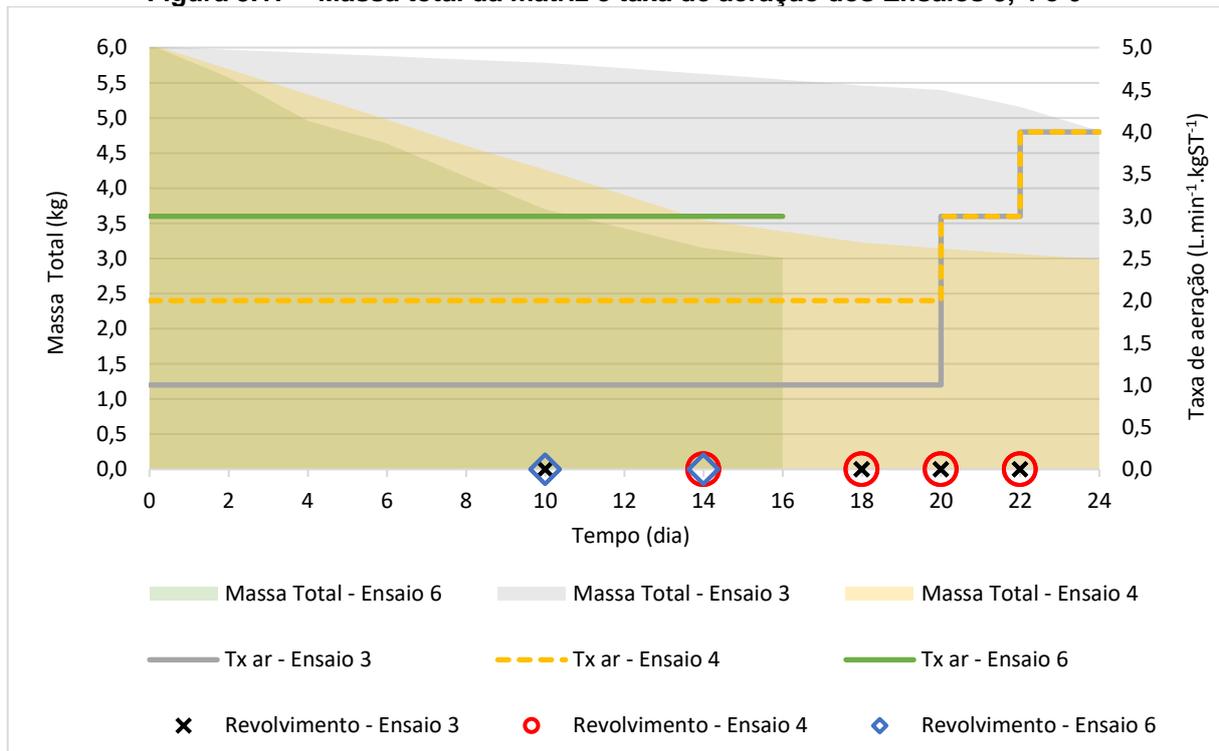


Figura 5.17 – Massa total da matriz e taxa de aeração dos Ensaios 3, 4 e 6



O Ensaio 6, com maior taxa de aeração, apresentou a maior redução mássica no 16º dia e o Ensaio 3, com menor taxa, apresentou a menor redução mássica.

Dessa forma, o Ensaio 3 com taxa de aeração de 1 L.min⁻¹.kgST⁻¹ não apresentou resultados esperados, apresentando que esse valor de aeração para essas condições

iniciais não é adequado, ou seja, não é suficiente para os microrganismos e não remove umidade da matriz.

Os Ensaio 4 e 6, com taxas de aeração de 2 e 3 L.min⁻¹.kgST⁻¹, apresentaram resultados melhores, sendo que atingiram valores de redução mássica similares no 24° e 16° dia, respectivamente. É importante ressaltar que a maior taxa de aeração foi responsável pela maior remoção mássica em um determinado tempo.

Ademais, observa-se que as taxas de aeração de 2 e 3 L.min⁻¹.kgST⁻¹ auxiliaram nas atividades dos microrganismos, gerando aumento da temperatura da matriz que atingiu a fase termofílica.

5.4.2. Proporção mássica

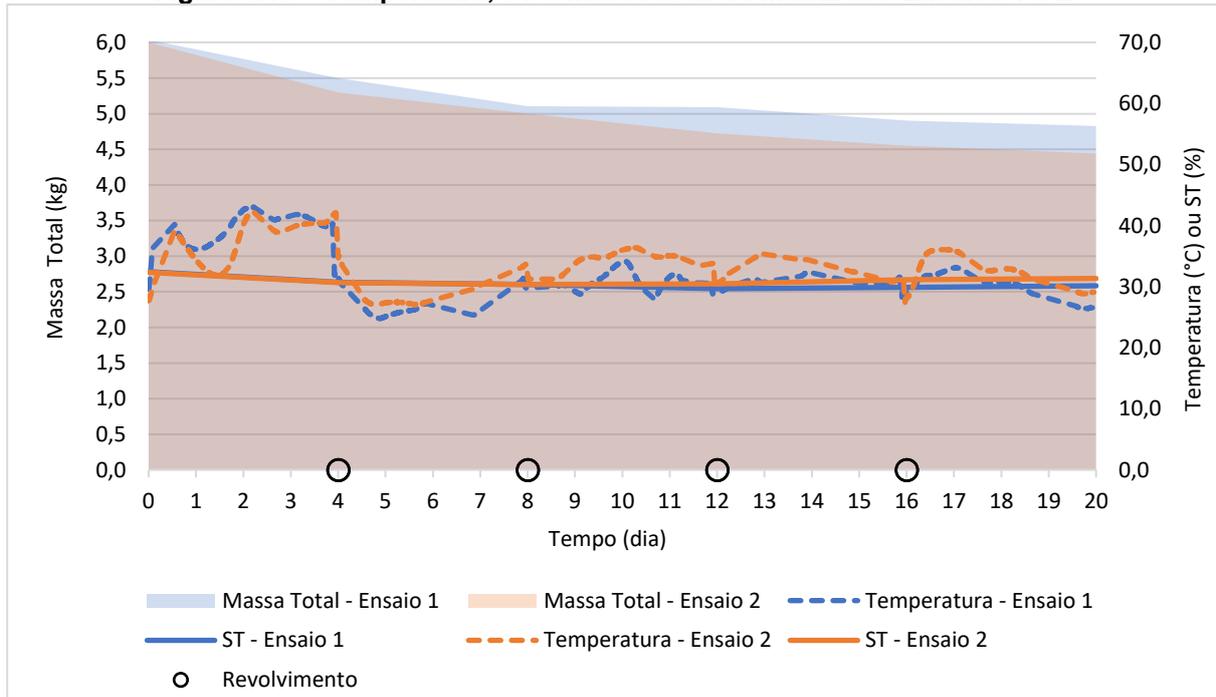
Para analisar o efeito de diferentes proporções mássicas, comparou-se os Ensaio 1 e 2 e 7 e 8 (Figura 5.18 e Figura 5.19). Os Ensaio 1 e 2 possuem a mesma umidade inicial da matriz (aproximadamente 68%), a mesma taxa de aeração de 1 L.min⁻¹.kgST⁻¹ e o revolvimento foi realizado nos mesmos dias (D4, D8, D12 e D16). Por outro lado, os Ensaio 7 e 8 possuem a mesma umidade inicial da matriz (aproximadamente 60%) e a mesma taxa de aeração de 2 L.min⁻¹.kgST⁻¹ e o revolvimento foi realizado nos mesmos dias (D10, D14 e D16).

A proporção mássica (lodo:serragem:ração) da matriz inicial dos Ensaio 1, 2, 7 e 8 é 6:1:2, 6:1:3, 6:1:3 e 6:1:5, respectivamente.

Observa-se que há pouca variação de temperatura, massa total e ST entre e durante os Ensaio 1 e 2. Conforme discutido no item 5.4.1, o valor da taxa de aeração de 1 L.min⁻¹.kgST⁻¹ não se mostrou adequado para as condições destes ensaios. Além disso, é importante ressaltar que os Ensaio 1 e 2 não atingiram o valor máximo de umidade (Quadro 5.8) para a utilização da matriz para geração de energia por meio de processo de combustão, que segundo Kudra et al. (2002) apud Reis et al. (2019) é de 55% e segundo Gyllenhammer (1998) apud Reis (2017) e Zhao et al. (1999) apud Reis (2017) é de 43%.

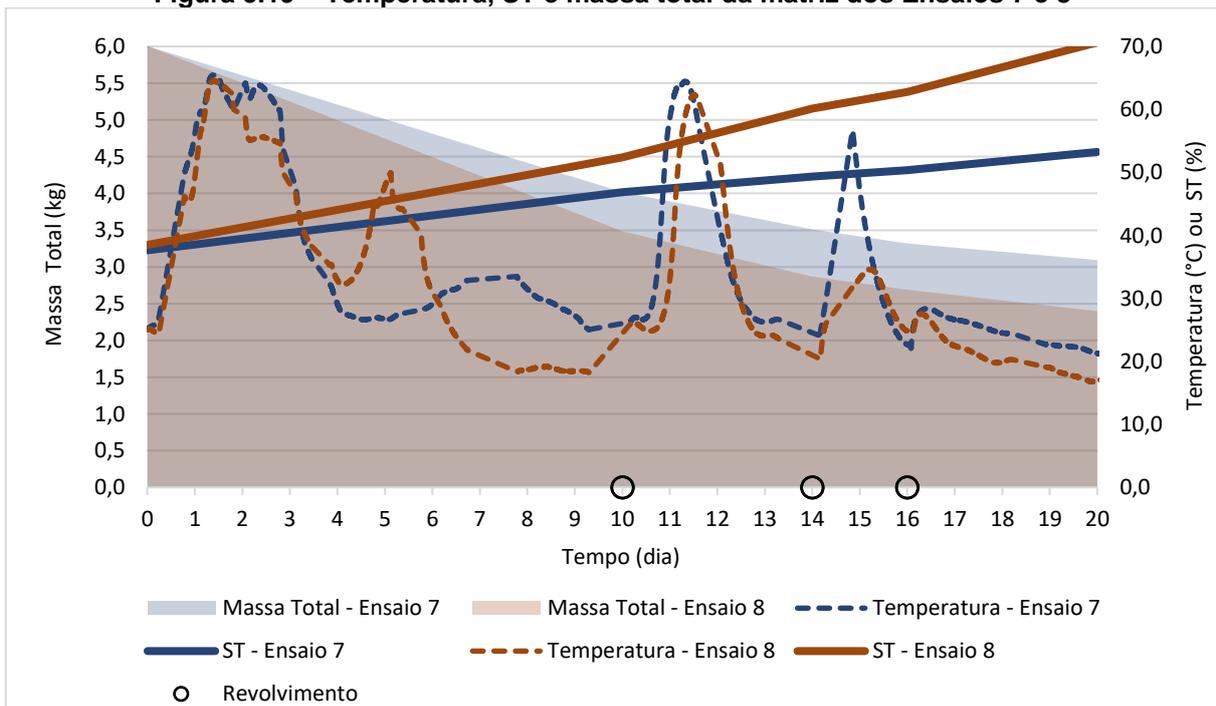
Outro fator importante de ser analisado são os dias nos quais foram realizados os revolvimentos da matriz nos Ensaio 1 e 2. Esses revolvimentos de uma forma geral foram realizados em dias pré-fixados, a cada 4 dias, coincidindo quando a temperatura da matriz apresentava tendência de aumento e ao realizar o revolvimento a temperatura caiu drasticamente, não atingindo valores superiores a 45°C.

Figura 5.18 – Temperatura, ST e massa total da matriz dos Ensaios 1 e 2



Após realizar os outros ensaios, foi possível constatar que a umidade inicial utilizada nos Ensaios 1 e 2 foi alta (aproximadamente 68%) e a taxa de aeração baixa ($1,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{Kg}^{-1}$), dificultando as atividades microbianas e, conseqüentemente, a elevação da temperatura e a remoção de água da matriz. Dessa forma, considerando apenas os ensaios 1 e 2 não foi possível determinar qual proporção mássica da matriz é melhor.

Figura 5.19 – Temperatura, ST e massa total da matriz dos Ensaios 7 e 8



Observa-se que os Ensaios 7 e 8, com umidade inicial de 62,33 e 61,48%, taxa de aeração de $2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{Kg}^{-1}$ e proporção mássica de 6:1:3 e 6:1:5, reduziram suas massas em 48,47 e 60,09% no 20º dia. Além disso, ambos os ensaios atingiram a fase termofílica. Os revolvimentos da matriz dos ensaios foram realizados quando a temperatura da matriz apresentava tendência de diminuição, auxiliando assim na homogeneização da matriz, na melhora do ambiente para as atividades microbianas e, conseqüentemente, na elevação da temperatura. Cabe ressaltar que o primeiro revolvimento do Ensaio 7 poderia ter sido realizado no 4º dia e do Ensaio 8 no 6º dia.

A umidade da matriz do Ensaio 7 diminuiu 15,6 pontos percentuais enquanto do Ensaio 8 diminuiu 32,1 pontos percentuais, atingindo o valor de 29,36% em 20 dias. Dessa forma, a matriz do Ensaio 8 após 10 dias de ensaio possui umidade de 47,61% e, portanto, pode ser utilizada na geração de energia por combustão, pois segundo Kudra et al. (2002) apud Reis et al. (2019) a umidade máxima do resíduo para a geração de energia por combustão é de 55%. Já a matriz do Ensaio 8 após 14 dias de ensaio possui umidade de 39,85% e, portanto, pode ser utilizada na geração de energia por combustão, de acordo com Gyllenhammer (1998) apud Reis (2017) e Zhao et al. (1999) apud Reis (2017) que estabelecem a umidade máxima de 43% para a geração de energia por combustão.

Sendo assim, a proporção mássica do Ensaio 8 (6:1:5) mostrou-se mais efetiva na redução de umidade (ou aumento do teor de sólidos – ST) e na redução de massa total. Porém, a evolução da temperatura nos Ensaios 7 e 8 foram parecidas, com rápido aumento da temperatura da matriz indicando degradação microbiana da matéria orgânica e concomitantemente da liberação do calor metabólico, sendo a evolução da temperatura classificada em ambos os ensaios com a fase mesofílica (D0 a D1), fase termofílica inicial (D1 a D3), fase termofílica secundária (D10 a D15 para o Ensaio 7 e D10 a D12 para o Ensaio 8) e fase de resfriamento (D15 a D20 para o Ensaio 7 ou D12 a D20 para o Ensaio 8).

Analisando esses quatro ensaios (1, 2, 7 e 8), observa-se que outro fator importante que influencia a biossecagem é o revolvimento, que quando realizado de acordo com a evolução da temperatura, garante-se um melhor controle e eficiência do processo, podendo reduzir o tempo de ensaio.

Outro fator, como descrito no item anterior 5.1.1, que influencia o processo de biossecagem é a taxa de aeração. Os Ensaios 1 e 2 e os Ensaios 3 e 4 utilizaram taxa de aeração de 1 e $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$, respectivamente. Observa-se que, nos ensaios 1 e 2 com baixa taxa de aeração, o processo de biossecagem não teve bom desenvolvimento,

pois não atingiram a fase termofílica, os valores de ST na matriz final são menores do que na matriz inicial e a redução mássica é baixa.

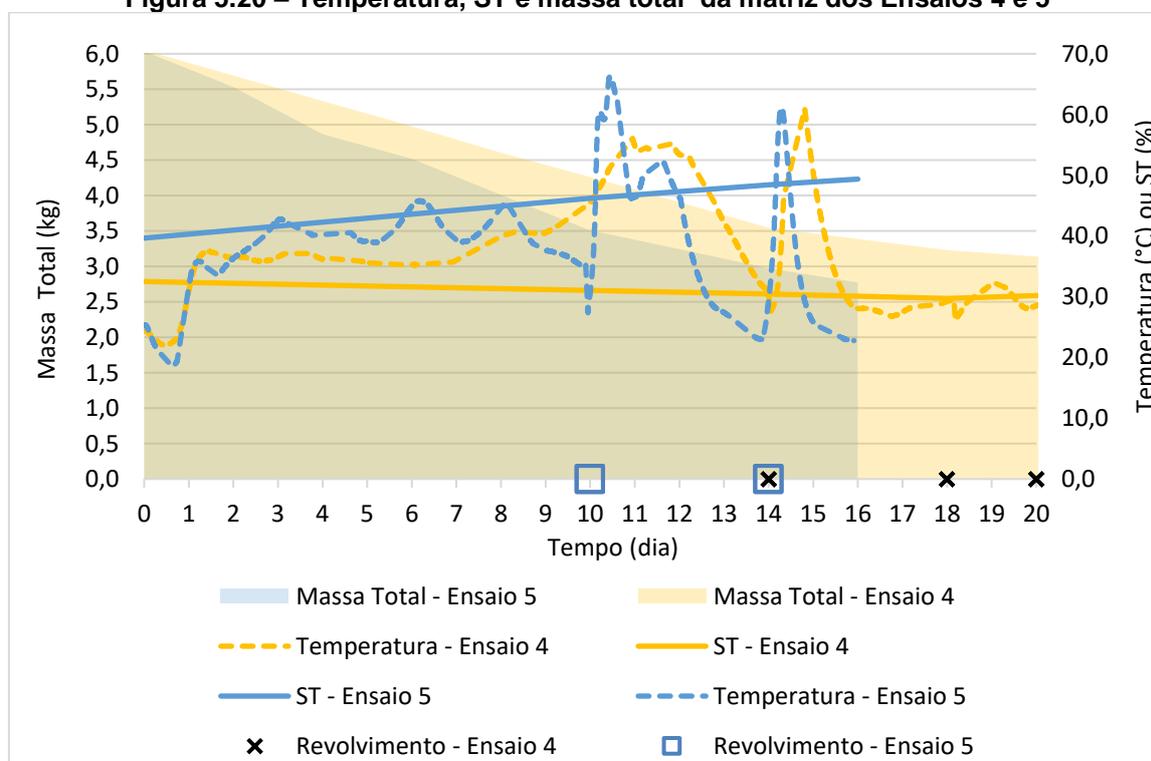
5.4.3. Umidade inicial da matriz

Para analisar o efeito da umidade inicial da matriz, comparou-se os Ensaio 4 e 5 (Figura 5.20). O Ensaio 4 teve duração total de 24 dias, contudo nesse item apenas será analisado os 20 primeiros dias desse ensaio, pois nesse período foi utilizada a taxa de aeração contínua e constante de $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$, que é a mesma taxa utilizada no Ensaio 5, que possui duração total de 16 dias. Além do mesmo valor da taxa de aeração, esses ensaios possuem a mesma proporção mássica (lodo:serragem:ração) de 0:1:8.

A umidade da matriz inicial dos Ensaio 4 e 5 é de 68 e 60%, respectivamente.

Observa-se que ambos os ensaios atingiram a fase termofílica. Os revolvimentos da matriz dos ensaios foram realizados quando a temperatura da matriz apresentava tendência de diminuição, auxiliando assim na homogeneização da matriz, na melhora do ambiente para as atividades microbianas e, conseqüentemente, na elevação da temperatura.

Figura 5.20 – Temperatura, ST e massa total da matriz dos Ensaio 4 e 5



A umidade da matriz do Ensaio 4 aumentou 2,34 pontos percentuais no 20º dia enquanto a umidade da matriz do Ensaio 5 diminuiu 9,7 pontos percentuais, atingindo o

valor de 50,62% em 16 dias. No 14^o dia dos Ensaio 4 e 5 a umidade atingiu valores de 69,52% e 51,57%, respectivamente.

Os valores de umidade das matrizes dos Ensaio 4 e 5 não atingiram o valor máximo de umidade para a utilização da matriz para geração de energia por meio de processo de combustão, que segundo Gyllenhammer (1998) apud Reis (2017) e Zhao et al. (1999) apud Reis (2017) é de 43%. Contudo, considerando o valor máximo de umidade de 55%, conforme aponta Kudra et al. (2002) apud Reis et al. (2019), a matriz do Ensaio 5 poderia ser utilizada para geração de energia por combustão, pois atinge umidade de 53,76% no 10^o dia de ensaio.

A redução mássica do Ensaio 4 e 5 foi de 50,61% no 24^o dia e de 54,04% no 16^o dia, respectivamente.

Assim, é possível constatar que a umidade da matriz inicial próxima à 60% possibilita maiores reduções mássicas e maiores valores de ST (ou valores inferiores de umidade) na matriz final, sendo que para evolução da temperatura não se mostrou tão determinante, visto que ambos os ensaios atingiram a fase termofilia após 10 dias, tendo um segundo pico de temperatura aos 14 dias após o revolvimento (D14).

5.4.4. Poder calorífico

A biossecagem do lodo de esgoto tem como objetivo reduzir a umidade preservando o poder calorífico para assim ser utilizado como biocombustível. O poder calorífico consiste na quantificação da energia liberada na forma de calor durante a combustão completa de uma unidade de massa, sendo, portanto, um parâmetro importante na avaliação da qualidade e viabilidade de um determinado resíduo para a geração de energia.

O poder calorífico é diretamente influenciado pela umidade do biocombustível, pois parte da energia liberada durante a combustão é utilizada para a evaporação da água. Assim, quando menor a umidade do biocombustível, maior é a eficiência energética da combustão. Dessa forma, o poder calorífico pode ser apresentado como:

- **Poder Calorífico Superior (PCS):** quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão completa de uma unidade de massa do combustível, sendo que a água presente ou formada durante essa reação de combustão é condensada e o calor gerado é recuperado. Assim, a energia total liberada é mensurada;

- **Poder Calorífico Inferior (PCI):** quantidade de energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível, pois é subtraído do PCS o valor associado à condensação do vapor de água formado na combustão.

O Quadro 5.28 apresenta os valores de PCI e PCS na base úmida e seca, em kcal.kg⁻¹, e da incerteza para:

- lodo de esgoto da campanha 2, que foi utilizado na preparação das matrizes dos ensaios 7 e 8;
- matriz D20 (matriz final ou lodo biosseco) do Ensaio 7, e;
- matriz D20 (matriz final ou lodo biosseco) do Ensaio 8.

Quadro 5.28 – Valores de PCI e PCS (base úmida e seca), em kcal.kg⁻¹, e da incerteza para o lodo da campanha 2, a matriz D20 do Ensaio 7, a matriz D0 do Ensaio 8 (sem adição de água destilada) e a matriz D20 do Ensaio 8

| Amostra | PCI (b.u.) | | PCS (b.u.) | | PCI (b.s.) | | PCS (b.s.) | |
|---------------------|--------------------------------|-----|--------------------------------|-----|--------------------------------|-----|--------------------------------|-----|
| | Valor (kcal.kg ⁻¹) | I |
| Lodo campanha 2 | 202 | 20 | 218 | 22 | 1240 | 120 | 1340 | 130 |
| Ensaio 7 matriz D20 | 1240 | 120 | 1340 | 130 | 3170 | 320 | 3430 | 340 |
| Ensaio 8 matriz D20 | 2410 | 240 | 2600 | 260 | 3760 | 380 | 4060 | 410 |

Nota: PCI: Poder calorífico inferior. PCS: Poder calorífico superior. I: Incerteza. b.u.: base úmida. b.s.: base seca.

É importante analisar a influência da umidade dos resíduos nos valores de PCS e PCI por meio da comparação dos valores na base úmida e seca. Os valores da umidade do lodo, da matriz D20 do ensaio 7 e da matriz D20 do ensaio 8 são, respectivamente, 81,81% (Quadro 5.1), 46,73% (Quadro 5.8) e 29,36% (Quadro 5.8). Analisando o Quadro 5.28 é possível observar que o poder calorífico na base seca é maior do que na base úmida para todas as amostras, sendo que o poder calorífico na base seca é 6,1, 2,6 e 1,6 vezes maior que na base úmida para lodo, a matriz D20 do ensaio 7 e a matriz D20 do ensaio 8, respectivamente. Além disso, ao analisar o Quadro 5.28, observa-se que os resíduos com menor umidade possuem maior poder calorífico na base seca. Assim, a umidade de um resíduo é inversamente proporcional ao poder calorífico.

Quadro 5.29 – Valores de PCI e PCS, em kJ.kg⁻¹, das amostras analisadas nas pesquisas e neste trabalho

| Pesquisa | Amostra | PCI (kJ.kg ⁻¹) b.u. | PCS (kJ.kg ⁻¹) b.u. | PCI (kJ.kg ⁻¹) b.s. | PCS (kJ.kg ⁻¹) b.s. | PCI (kJ.kg ⁻¹) * | PCS (kJ.kg ⁻¹) * |
|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Autor (2020) | Lodo campanha 2 | 845 | 912 | 5188 | 5607 | - | - |
| Autor (2020) | Produto do Ensaio 7 (matriz D20) | 5188 | 5607 | 13263 | 14351 | - | - |
| Autor (2020) | Produto do Ensaio 8 (matriz D20) | 10083 | 10878 | 15732 | 16987 | - | - |
| Winkler et al (2013) | Produto | 7700 | 10400 | - | - | - | - |
| Reis (2017) | Matriz inicial dos Ensaio C, B1 e B2 | - | - | - | 18245 | - | - |
| Reis (2017) | Produto do Reator C | - | - | - | 10861 | - | - |
| Reis (2017) | Produto do Reator B1 | - | - | - | 14776 | - | - |
| Reis (2017) | Produto do Reator B2 | - | - | - | 17552 | - | - |
| Reis (2017) | Produto do Reator B | - | - | 14460 | 14661 | - | - |
| Hao, Yang e Jahng (2018) | Lodo desaguado | - | - | - | - | 598±8 | 17225±55 |
| Hao, Yang e Jahng (2018) | Matriz inicial do Teste A | - | - | - | - | 3547±8 | 17208±26 |
| Hao, Yang e Jahng (2018) | Matriz inicial do Teste B | - | - | - | - | 5164±40 | 20738±125 |
| Hao, Yang e Jahng (2018) | Matriz inicial do Teste C | - | - | - | - | 3577±28 | 18335±97 |
| Hao, Yang e Jahng (2018) | Produto do Teste A | - | - | - | - | 4834±38 | 15103±94 |
| Hao, Yang e Jahng (2018) | Produto do Teste B | - | - | - | - | 10162±61 | 18925±104 |
| Hao, Yang e Jahng (2018) | Produto do Teste C | - | - | - | - | 6221±17 | 17795±39 |

Nota: PCI: Poder calorífico inferior. PCS: Poder calorífico superior. b.u.: base úmida. b.s.: base seca. * base não informada na pesquisa. ** matriz inicial do Ensaio 8 (proporção mássica 6:1:5, lodo:serragem:ração) sem adição de água destilada.

Fonte: Autor (2020), Winkler et al (2013), Reis (2017) e Hao, Yang e Jahng (2018).

Segundo Hao, Yang e Jahng (2018), Reis (2017) e Reis et al. (2019), SV é um parâmetro aproximado do poder calorífico, portanto, quanto maior o valor de SV, maior o poder calorífico. Os valores de SV do lodo, da matriz D20 do ensaio 7 e da matriz D20 do ensaio 8 são, respectivamente, 53,29% (Quadro 5.1), 64,76% (Quadro 5.9) e 66,22% (Quadro 5.9). Comparando os valores do poder calorífico na base seca e úmida com os valores de SV de todas as amostras, observa-se que há uma relação diretamente proporcional entre esses dois parâmetros. Pode-se concluir que ambos os parâmetros, SV e umidade, influenciam, concomitantemente, o valor do poder calorífico.

O Quadro 5.30 e o Quadro 5.29 apresentam, respectivamente, as compilações dos valores de PCI e PCS, em kJ.kg^{-1} , de alguns materiais comumente utilizados em estações de incineração para geração de energia e das amostras analisadas nas pesquisas e neste trabalho.

Quadro 5.30 – Valores de PCS e PCI na base úmida, em kJ.kg^{-1} , de alguns materiais comumente utilizados em estações de incineração para geração de energia

| Material | PCI (kJ.kg^{-1}) (b.u.) | PCS (kJ.kg^{-1}) (b.u.) | Referência |
|---------------------------------------|--|--|---|
| Aglomerados de biomassa | 9500 | 10450 | KEMA (1999) ⁹ |
| Lodo de esgoto seco (térmico) | 12500 | 13585 | EPON e KEMA (2000) ¹⁰ |
| Resíduo municipal com plástico | 12300 | 14000 | Venendaal (1994) ¹¹ |
| Carvão marrom | 10100 | 11900 | Hein (1994) ¹² |
| Carvão antracito | 33200 | 33900 | van Doorn, Bruyn e Vermeij (1996) ¹³ |

Nota: PCI: Poder calorífico inferior. PCS: Poder calorífico superior. b.u.: base úmida.

Fonte: adaptado de Winkler et al. (2013).

Segundo Spliethoff (2010)¹⁴ apud Hao, Yang e Jahng (2018), o valor do PCI deve ser superior a 4.000 kJ.kg^{-1} para um resíduo possuir uma combustão autossustentável. Assim, observa-se que o lodo de esgoto possui baixo valor de PCI na base úmida (845 kJ.kg^{-1}), isto é, o lodo *in natura*, não é um resíduo viável para ser utilizado na geração de energia, sendo necessário processos, como a biossecagem, para viabilizar seu uso energético.

As matrizes iniciais apresentadas na pesquisa de Hao, Yang e Jahng (2018) possuem valores de PCI próximos ou inferiores à 4.000 kJ.kg^{-1} . Os valores de PCI dos produtos de todas as pesquisas apresentados no Quadro 5.29 são superiores à 4.000 kJ.kg^{-1} , portanto possuem combustão autossustentável.

Ao comparar os valores de PCI apresentados no Quadro 5.29 com os dos materiais comumente utilizados em estações de incineração para geração de energia (Quadro 5.30), observa-se que o valor do PCI b.u. do produto do Ensaio 8 deste trabalho, do PCI do produto do Teste B de Hao, Yang e Jahng (2018) e do PCI b.s. do produto do

⁹ KEMA. *Milieu-effectrapport, bijstoken secundaire brandstoffen in de Centrale Maasvlakte*, KEMA, Arnhem, 9856650-KST/MVC 98–3049, 1999.

¹⁰ EPON & KEMA. *Milieu-effectrapport Afvalvergassing Eemscentrale*, EPON, Zwolle, 98560219-KPS/MEC 99–3017, 2000.

¹¹ VENENDAAL, R. *Vergassing van afval. Evaluatie van de installaties van Thermoselect en TPS/Greve, Energiewinning uit afval en biomassa*. Utrecht, BTG, KEMA en VVAV, Novem-EWAB No. 9407, p. 114, 1994.

¹² HEIN, K.R.K. *Combined Combustion of Biomass/Sewage Sludge and Coals Clean Coal Technology Programme*. IVD, Stuttgart, ISBN 3-928123-16, 1994.

¹³ VAN DOORN, J., BRUYN, P., VERMEIJ, P., *Combined combustion of biomass, municipal sewage sludge and coal in an atmospheric fluidized bed installation. Proceeding of the 9th European Bioenergy Conference 2 1007–1012*, 1996.

¹⁴ Spliethoff, H. *Power Generation from Solid Fuels*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Germany. 2010.

Reator B de Reis (2017) são próximos ao valor do PCI b.u. dos aglomerados de biomassa (9.500 kJ.kg^{-1}) e do carvão marrom ($10.100 \text{ kJ.kg}^{-1}$).

Conforme apresentado no item 5.4.2, os Ensaios 7 e 8 possuem a mesma umidade inicial da matriz, taxa de aeração e o revolvimento foi realizado nos mesmos dias. Contudo, a proporção mássica (lodo:serragem:ração) da matriz inicial dos Ensaios 8 e 7 são diferentes (6:1:5 e 6:1:3, respectivamente). A umidade (Quadro 5.8) e SV (Quadro 5.9) do produto do Ensaio 8 são, respectivamente, 29,36% e 66,22% e do Ensaio 7, 46,73% e 64,76%. O valor de PCI b.u. do produto do Ensaio 8 ($10.083 \text{ kJ.kg}^{-1}$) é 1,9 vezes maior do que do produto do Ensaio 7 (5.188 kJ.kg^{-1}). É possível observar, por meio dessa comparação, que a proporção mássica da matriz inicial influencia os processos da biossecagem e conseqüentemente as características qualitativas e quantitativas do produto. Assim, o produto do Ensaio 8 é o melhor resíduo para o uso energético, pois possui menor umidade e maior poder calorífico.

6. CONCLUSÃO

Por meio da análise bibliométrica e da seleção dos artigos referentes a biossecagem do lodo de esgoto pode-se observar que os artigos são recentes, sendo que a maioria dos trabalhos foram publicados no período de 5 anos (2015 a 2019).

Observa-se que os resultados no formato de artigos de revistas são específicos, isto é, apresentam apenas um fragmento de análise do processo de biossecagem, não exibindo de forma integrada todos os fatores e procedimentos operacionais que influenciam o processo. Além do mais, é importante que os resultados dos ensaios sejam padronizados, assim como as unidades de cada variável, de modo a permitir a comparação entre as diversas pesquisas realizadas.

Conclui-se que a maioria dos estudos realizados são internacionais, sendo importante realizar pesquisas com o lodo de esgoto e sua destinação ambientalmente adequada ao contexto brasileiro. Nesse sentido, a presente pesquisa avançou no estudo da biossecagem do lodo ao conseguir atingir temperaturas termofílicas, fato que não foi alcançado em outras pesquisas recentes realizadas no Brasil.

Após a compilação e a sistematização das pesquisas e resultados dos ensaios de biossecagem descritos na literatura, notou-se que os artigos não utilizam apenas um tipo de lodo, utilizam uma mistura de diferentes tipos de lodo (anaeróbio, anóxico e aeróbio). No Brasil, as pesquisas realizadas utilizaram apenas o lodo anaeróbio.

Constatou-se a falta de padronização nas pesquisas de quando o processo de biossecagem termina. Observa-se que o término da biossecagem é preestabelecido na metodologia das pesquisas por meio da duração do processo, que pode variar de 8 a 24 dias. Outro ponto observado é a falta de determinação das características e dos seus respectivos valores que definem a qualidade do lodo utilizado e do produto da biossecagem (lodo biosseco).

Conclui-se que a taxa de aeração, a proporção mássica da matriz inicial e a umidade da matriz inicial influenciam a biossecagem do lodo de esgoto. Os valores de umidade da matriz inicial próximos a 60%, taxa de aeração superiores ou iguais a $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kgST}^{-1}$ e proporção mássica de 6:1:5 (lodo:serragem:ração) apresentaram resultados melhores em termos de elevação de temperatura (atingindo a fase termofílica), de redução de massa (redução mássica de 60,09%) e de umidade (umidade da matriz final de 29,36%) e de poder calorífico (PCI b.u. de $10.083 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), resultados obtidos no Ensaio 8.

Outro fator importante que influencia a biossecagem é o revolvimento, que quando realizado de acordo com a evolução da temperatura procedimento adotado em todos os ensaios com exceção dos Ensaio 1 e 2, possibilita um melhor controle e eficiência do processo, podendo reduzir o tempo da biossecagem de acordo com as características do produto desejado.

Conclui-se que o lodo de esgoto *in natura* possui baixo valor de PCI na base úmida (845 kJ.kg^{-1}), sendo, portanto, necessário processos, como a biossecagem, para viabilizar seu uso energético. O produto do Ensaio 8 possui menor umidade e maior poder calorífico, sendo o resíduo dessa pesquisa mais viável para o uso energético.

7. SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

Algumas sugestões e/ou recomendações para trabalhos futuros sobre biossecagem são:

- Realizar ensaios utilizando a mesma proporção mássica (lodo:serragem:ração), contudo variando a quantidade referente a ração e serragem;
- Realizar ensaios utilizando a mesma proporção mássica e umidade inicial, contudo com diferentes taxas de aeração;
- Realizar ensaios utilizando proporção mássica (lodo:serragem:ração) inferior à utilizada nessa pesquisa;
- Realizar ensaios apenas com a mistura do lodo e *bulking agents*, isto é, sem a adição de água destilada;
- Realizar ensaios com outros tipos de *bulking agents* misturados ao lodo;
- Realizar ensaios utilizando lodo aeróbio ou mistura de lodos;
- Medir o poder calorífico do lodo, dos *bulking agents* e da matriz ao longo do processo de biossecagem;
- Compilar informações referentes à preparação da matriz e os procedimentos operacionais, assim como das formas de avaliação da biossecagem de novas publicações;
- Medir todas as variáveis necessárias para realizar o cálculo da remoção de umidade (conforme apresentado no item 3.2.2.2.1) e das trocas de calor (conforme apresentado no item 3.2.2.2.2) ao longo dos ensaios;
- Estudar os microrganismos ao longo dos ensaios;
- Melhorar o design do reator de biossecagem:
 - Fazer um sistema de lacre e fechamento que não dependa de sílica gel;
 - Fazer mais saídas de ar na parte superior da tampa;
 - Injetar o ar na parte inferior da matriz por meio de mais saídas;
 - Empregar um sistema de revolvimento mecânico.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2004. p. 71.
- ACHON, C. L. KELLNER, E. AKUTSU, J. Subsídios para a gestão de esgotamento sanitário: abordagem da fase sólida. In: AMÉRICO-PINHEIRO, J. H. P. et. al. (Org.). **Recursos Hídricos gestão e sustentabilidade**. 2. ed. Tupã: ANAP, 2017. p. 224.
- ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. Gestão de Resíduos dos serviços de saneamento (água e esgoto), a Lei 12,305/2010 e os desafios no Brasil. In: XXXV Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental (AIDIS), **Anais**. Catagena – Colombia, 21 a 24 de agosto de 2016, ID 1955. 2016. p.7.
- ADANI, F.; TAMBONE, F. **Long-term effect of sewage sludge application on soil humic acids**. Elsevier: *Chemosphere*, v. 60, 1214-1221p, 2005.
- AKUTSU, J., ACHON, C. L., MARTINS, J. E. M. P., KELLNER, E., ALMEIDA, M. C. R. Avaliação do processo de compostagem de resíduos sólidos nas fases sólida e gasosa através de métodos convencional e respirométrico. In: **30º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2019, Natal. Rio de Janeiro: ABES, 2019.
- ALMEIDA, M. C. R., LUCTTI, T. B. M., ACHON, C. L., REIS, R. F., AKUTSU, J. Influência da taxa de aeração no processo de biossecagem de lodo gerado em estação de tratamento de esgoto. In: **30º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2019, Natal. Rio de Janeiro: ABES, 2019.
- ANDREOLI, C. V., VON SPERLING, M., FERNANDES, F. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. p.484.
- BERTTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (ed.) **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna. Embrapa Meio Ambiente, 2006, 349p.
- BITTENCOURT, S., SERRAT, B. M., AISSE, M. M. Regulamentação brasileira quanto à frequência de monitoramento de lodo de esgoto para uso agrícola: estudo de caso do estado do Paraná. **Revista DAE**. v.206, p 21-31., 2017.
- BRASIL. Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Congresso Nacional, Brasília, DF, 2010.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 498, 19 de agosto de 2020**. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de bioossólido em solos, e dá outras providências.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 375, 29 de agosto de 2006**. Dispõem sobre os critérios e

procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 430, 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

CAI, L., CHEN, T-B., GAO, D., YU, J. *Bacterial communities and their association with the bio-drying of sewage sludge*. **Water Research**. v.90, p.44-51, 2016a.

CAI, L., CHEN, T-B., GAO, D., ZHENG, G-D., LIU, H-T., PAN, T-H. *Influence of forced air volume on water evaporation during sewage sludge bio-drying*. **Water Research**. v.47, p.4767-4773, 2013.

CAI, L., CHEN, T-B., ZHENG, S-W., LIU, H-T., ZHENG, G-D. *Decomposition of lignocellulose and readily degradable carbohydrates during sewage sludge biodrying, insights of the potential role of microorganisms from a metagenomic analysis*. **Chemosphere**. v.201, p.127-136, 2018a.

CAI, L., GAO, D., CHEN, T-B., LIU, H-T., ZHENG, G-D., YANG, Q-W. *Moisture variation associated with water input and evaporation during sewage sludge bio-drying*. **Bioresource Technology**. v.117, p.13-19, 2012.

CAI, L., GAO, D., HONG, N. *The Effects of Different Mechanical Turning Regimes on Heat Changes and Evaporation During Sewage Sludge Biodrying*. **Drying Technology**. v.33, p.1151-1158, 2015.

CAI, L., KRAFFT, T., CHEN, T-B., GAO, D., WANG, L. *Structure modification and extracellular polymeric substances conversion during sewage sludge biodrying process*. **Bioresource Technology**. v.216, p.414-421, 2016b.

CAI, L., KRAFFT, T., CHEN, T-B., LV, W-Z., GAO, D., ZHANG, H-Y. *New insights into biodrying mechanism associated with tryptophan and tyrosine degradations during sewage sludge biodrying*. **Bioresource Technology**. v.244, p.132-141, 2017.

CAI, L., ZHENG, S-W., SHEN, Y-J, ZHENG, G-D., LIU, H-T., WU, Z-Y. *Complete genome sequence provides insights into the biodrying-related microbial function of *Bacillus thermoamylovorans* isolated from sewage sludge biodrying material*. **Bioresource Technology**. v.260, p.141-149, 2018b.

CASTRO, J. R. Por que crescer não é tudo na economia, segundo esta autora. **NEXO JORNAL LTDA**. 06 jul. 2019. Disponível em: <<https://www.nexojournal.com.br/entrevista/2019/07/06/Por-que-crescer-n%C3%A3o-%C3%A9-tudo-na-economia-segundo-esta-autora>>. Acesso em: 01 mar. 2020.

- CAVALCA, D. L. **BibView - Análise Bibliométrica**. Disponível em: <<https://diegocavalca.shinyapps.io/bibView/>>. Acesso em: 09 jul 2018.
- CORREIA, J. E. **Caracterização Físico-química e microbiológica do lodo gerado na estação de tratamento de esgoto contorno**. Feira de Santana, BA. 2009. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2009.
- DA SILVA, A. G.; LEITE, V. D.; DA SILVA, M. M. P; PRASAD, S.; FEITOSA, W. B. da S. **Compostagem aeróbia conjugada de lodo de tanque séptico e resíduos sólidos vegetais**. Engenharia Sanitária Ambiental. Rio de Janeiro: ABES. 2008, v. 13, n. 4, p. 371-379, out./dez. 2008.
- DA SILVA, A. R. **Gestão dos riscos ocupacionais no manejo do lodo de estações de tratamento de esgotos e a NBR ISO 31000**. São Carlos, SP, 2019. p. 140. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana - Universidade Federal de São Carlos, 2019.
- DE GUARDIA, A., PETIOT, C., ROGEAU, D. *Influence of aeration rate and biodegradability fractionation on composting kinetics*. **Waste Management**. v.28, p.73-84, 2008.
- FIXEN, P. E.; JOHNSTON, A. M. *World fertilizer nutrient reserves: a view to the future*. **Journal of the science of Food and Agriculture**. v.92, p. 1001-1005, 2012.
- HAO, Z., YANG, B., JAHNG, D. *Spent coffee ground as a new bulking agent for accelerated biodrying of dewatered sludge*. **Water Research**. v.138, p. 250-263, 2018.
- HUILIÑIR, C., VILLEGAS, M. *Simultaneous effect of initial moisture content and airflow rate on biodrying of sewage sludge*. **Water Research**, v. 82, p. 118-128, 2015.
- INSTITUT MONTAIGNE. *The circular economy: reconciling economic growth with the environment*. **Policy Paper**, França: 2016.
- LI, Q., LU, X., GUO, H., YANG, Z., LI, Y., ZHI, S., ZHANG, K. *Sewage sludge drying method combining pressurized electro-osmotic dewatering with subsequent bio-drying*. **Bioresource Technology**. v.263, p. 94-102, 2018.
- LUCATTI, T. B. M., ACHON, C. L., REIS, R. F., CORDEIRO, J. S., AKUTSU, J. Estudo do Processo de Biossecagem de Lodo de ETE. In: **29º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2017, São Paulo. Rio de Janeiro: ABES, 2017.
- MA, J., ZHANG, L., LI, A. *Energy-efficient co-biodrying of dewatered sludge and food waste: Synergistic enhancement and variables investigation*. **Waste Management**. v.56, p. 411-422, 2016.
- MA, J., ZHANG, L., MU, L., ZHU, K., LI, A. *Multivariate insights of bulking agents influence on co-biodrying of sewage sludge and food waste: Process performance, organics degradation and microbial community*. **Science of the Total Environment**. v.681, p. 18-27, 2019.

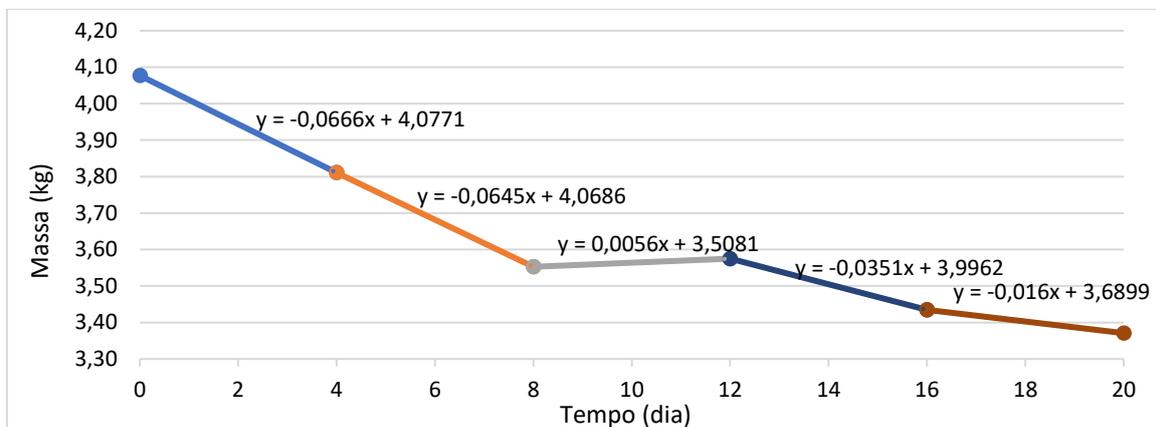
- MAGALHÃES, J. M. M. **Caracterização inicial do lodo de esgoto de uma indústria de bebidas**. Monografia (Conclusão de curso de Gestão Ambiental na Agropecuária). 2008, 39 f. Escola Agrotécnica Federal. Inconfidentes, MG, 2008.
- NAVAEE-ARDEH, S., BERTRAND, F., STUART, P. R. *Key variables analysis of a novel continuous biodrying process for drying mixed sludge*. **Bioresource Technology**. v.101, p. 3379-3387. 2010.
- PSALTIS, P., KOMILIS, D. *Environmental and economic assessment of the use of biodrying before thermal treatment of municipal solid waste*. **Waste Management**. v.83, p. 95-103, 2019.
- REIS, R. F. **Sistema de Remoção de Água de Lodo Gerado em Estação de Tratamento de Esgoto com Duas Fases: Desaguamento Inicial em Leito de Drenagem Seguido de Biossecagem**. São Carlos, SP, 2017. p. 256. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana - Universidade Federal de São Carlos, 2017.
- REIS, R. F., CORDEIRO, J. S., FONT, X., ACHON, C. L. *The biodrying process of sewage sludge – a review*. **Drying Technology**, p.14, 2019.
- SOARES, P. B., CARNEIRO, T. C. J., CALMON, J. L., CASTRO, L. O. C. O. Análise bibliométrica da produção científica brasileira sobre Tecnologia de Construção e Edificações na base de dados *Web of Science*. **Ambiente Construído**. v.16, n.1, p.175-185, 2016.
- TOM, A. P., PAWELS, R., HARIDAS, A. *Biodrying process: A sustainable technology for treatment of municipal solid waste with high moisture content*. **Waste Management**. v.49, p. 64-72, 2016.
- VAN DER HOECK, J., P., DE FOOIJ, H., STRUKER, A. *Wastewater as a resource: Strategies to recover resources from Amsterdam's wastewater*. **Resources, Conservation and Recycling**. v.113, p. 53-64, 2016.
- VELIS, C. A., LONGHURST, P. J., DREW, G. H., SMITH, R., POLLARD, S. J. T. *Biodrying for mechanical–biological treatment of wastes: A review of process science and engineering*. **Bioresource Technology**. v.100, p. 2747-2761, 2009.
- VERSTRAETE, W., VAN DE CAVEYE, P., DIAMANTIS, V. *Maximum use of resources present in domestic “used water”*. **Bioresource Technology**. v.100, p. 5537-5545, 2009.
- VILLEGAS, M., HUILIÑIR, C. *Biodrying of sewage sludge: Kinetics of volatile solids degradation under different initial moisture contents and air-flow rates*. **Bioresource Technology**. v.174, p.33-41, 2014.
- WINKLER, M. -K.H., BENNENBROEK, M. H., HORSTINK, F. H., VAN LOOSDRECHT, M. C. M., VAN DE POL, G. -J. *The biodrying concept: An innovative technology creating energy from sewage sludge*. **Bioresource Technology**, v. 147, p. 124-129, 2013.

- WU, Z-Y., CAI, L., KRAFFT, T., GAO, D., WANG, L. *Biodrying performance and bacterial community structure under variable and constant aeration regimes during sewage sludge biodrying.* **Drying Technology.** 36:1, p. 84-92, 2018.
- YANG, B., ZHANG, L., JAHNG, D. *Importance of initial moisture content and bulking agent for biodrying sewage sludge.* **Drying Technology.** v.32, p. 135-144, 2014.
- YU, D., YANG, M., QI, L., LIU, M., WANG, Y., WEI, Y. *Effects of aeration on matrix temperature by infrared thermal imager and computational fluid dynamics during sludge bio-drying.* **Water Research.** v.122, p. 317-328, 2017.
- YUAN, J., ZHANG, D., LI, Y., CHADWICK, D., LI, G., LI, Y., DU, L. *Effects of adding bulking agents on biostabilization and drying of municipal solid waste.* **Waste Management.** v.62, p. 52-60, 2017.
- YUAN, J., ZHANG, D., MA, R., WANG, G., LI, Y., LI, S., TANG, H., ZHANG, B., LI, D., LI, G. *Effects of inoculation amount and application method on the biodrying performance of municipal solid waste and the odor emissions produced.* **Waste Management.** v.93, p. 91-99, 2019.
- ZHANG, D., LUO, W., YUAN, J., LI, G. *Co-biodrying of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste: Role of mixing proportions.* **Waste Management.** v.77, p. 333-340, 2018.
- ZHANG, J., CAI, X., QI, L., SHAO, C., LIN, Y., ZHANG, J., ZHANG, Y., SHEN, P., WEI, Y. *Effects of aeration strategy on the evolution of dissolved organic matter (DOM) and microbial community structure during sludge bio-drying.* **Environmental Biotechnology.** v.99, p. 7321-7331, 2015.
- ZHAO, L., GU, W-M., HE, P-J., SHAO, L-M. *Biodegradation potential of bulking agents used in sludge bio-drying and their contribution to bio-generated heat.* **Water Research.** v.45, p. 2322-2330, 2011a.
- ZHAO, L., GU, W-M., HE, P-J., SHAO, L-M. *Effect of air-flow rate and turning frequency on bio-drying of dewatered sludge.* **Water Research.** v.44, p. 6144-6152, 2010.
- ZHAO, L., WANG, X-Y., GU, W-M., SHAO, L-M., HE, P-J. *Distribution of C and N in soluble fractionations for characterizing the respective biodegradation of sludge and bulking agents.* **Bioresource Technology.** v.102, p. 10745-10749, 2011b.
- ZUPIC, I., ČATER, T. *Bibliometric Methods in Management and Organization.* **Organizational Research Methods.** v.18, n.3, p.429–472, 2015.

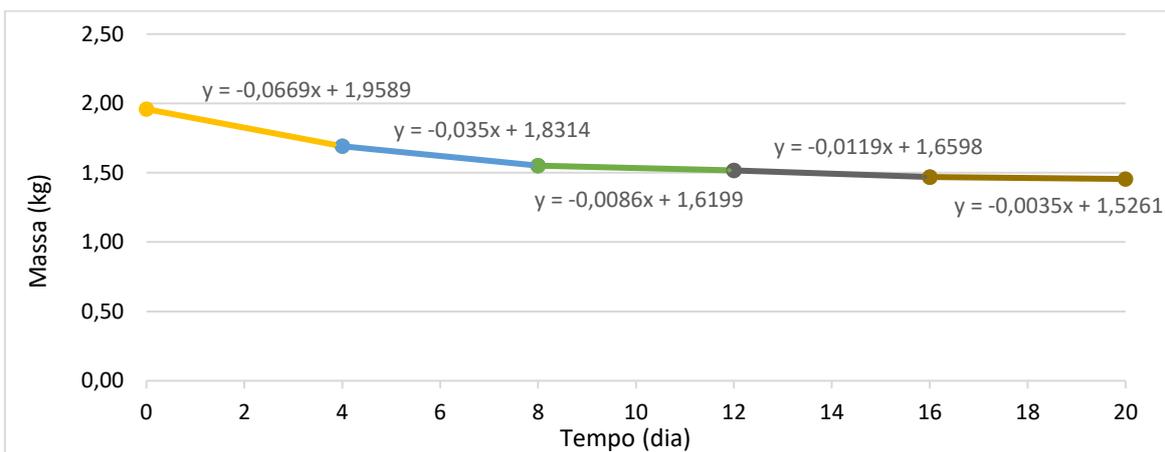
APÊNDICE A – Gráficos da massa de água e de sólidos dos ensaios de biossecagem

• Ensaio 1

Massa de U

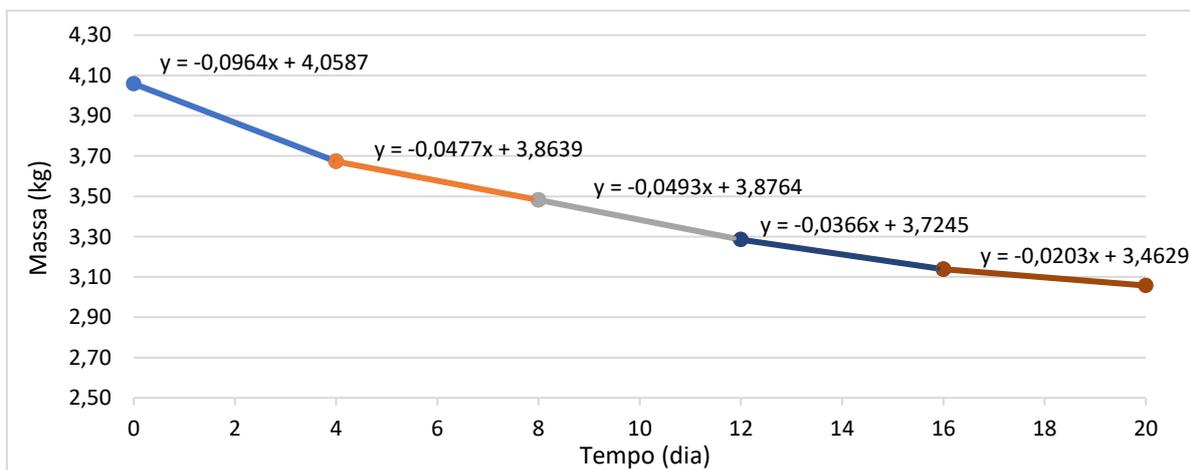


Massa de ST

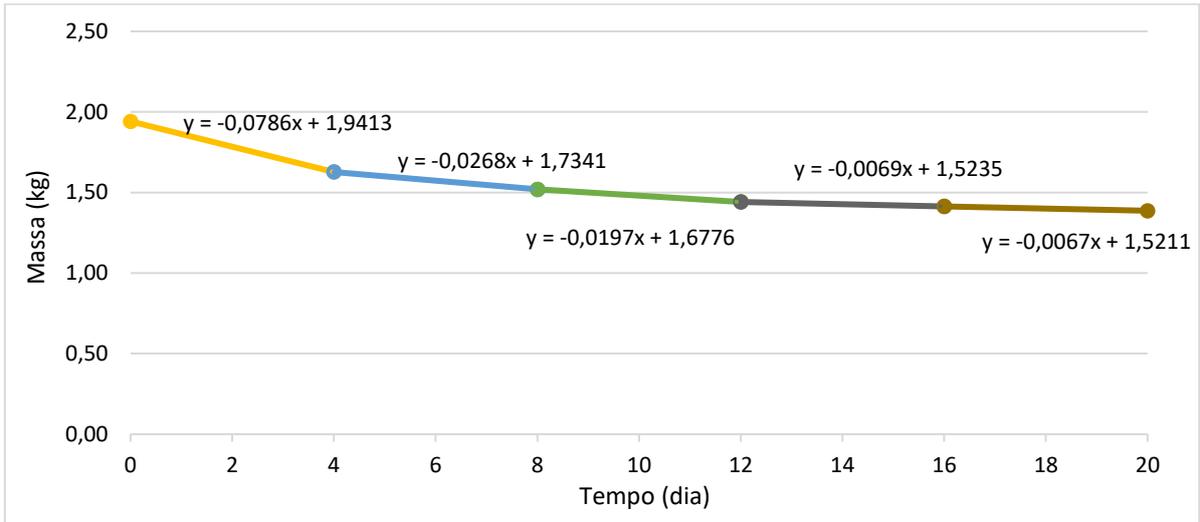


• Ensaio 2

Massa de U

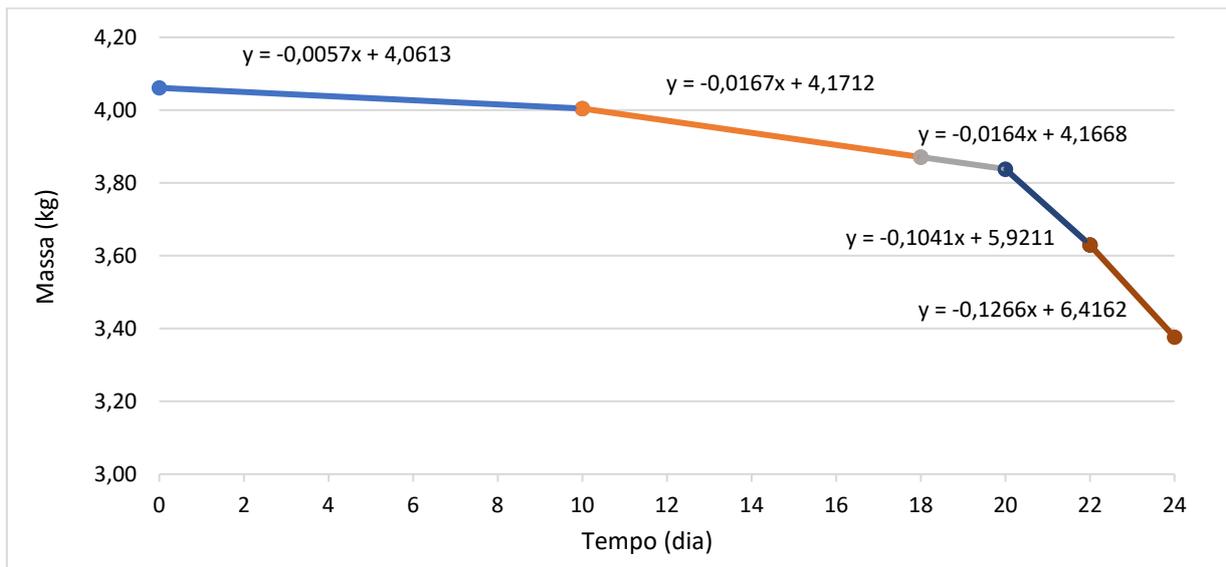


Massa de ST

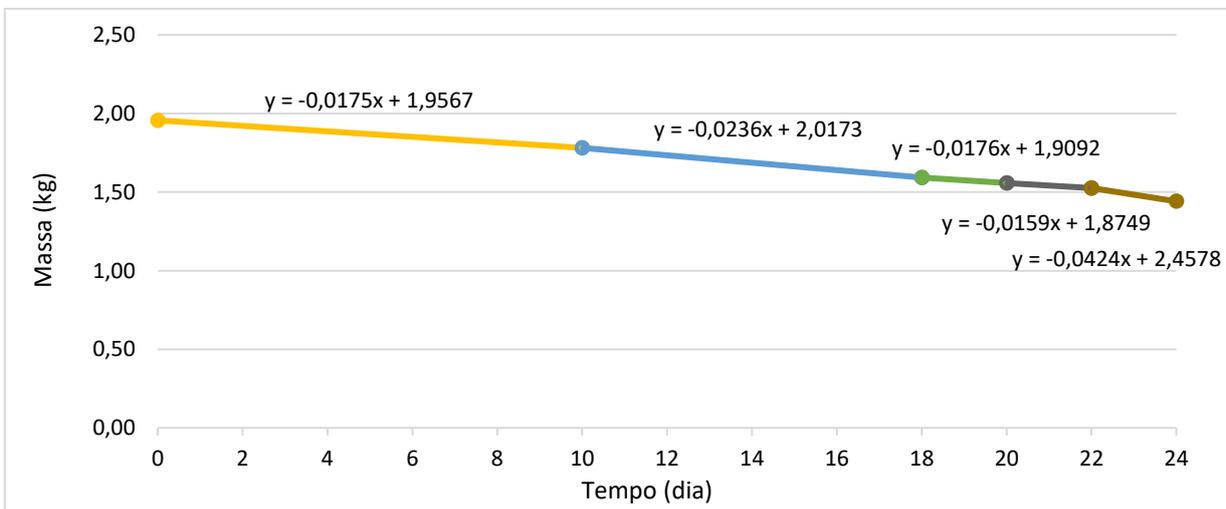


• **Ensaio 3**

Massa de U

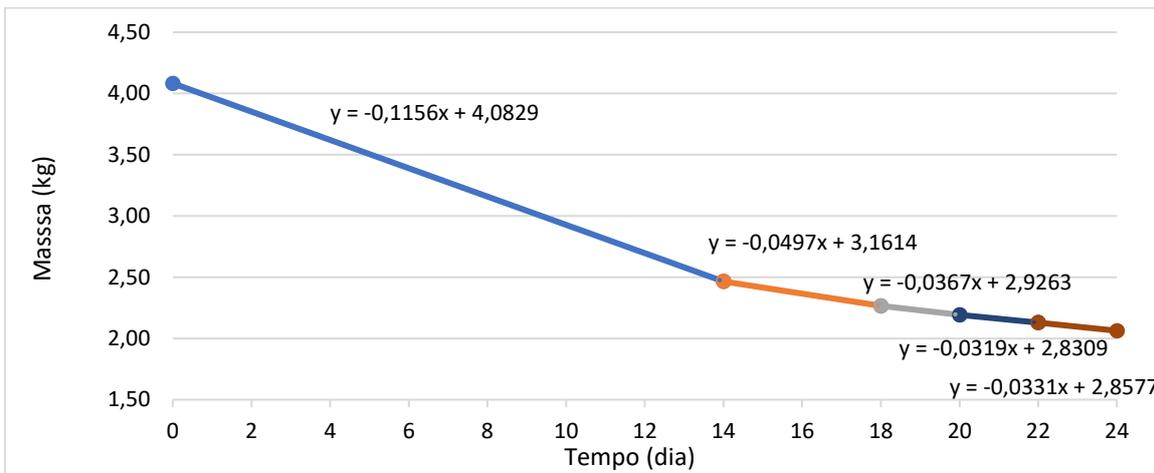


Massa de ST

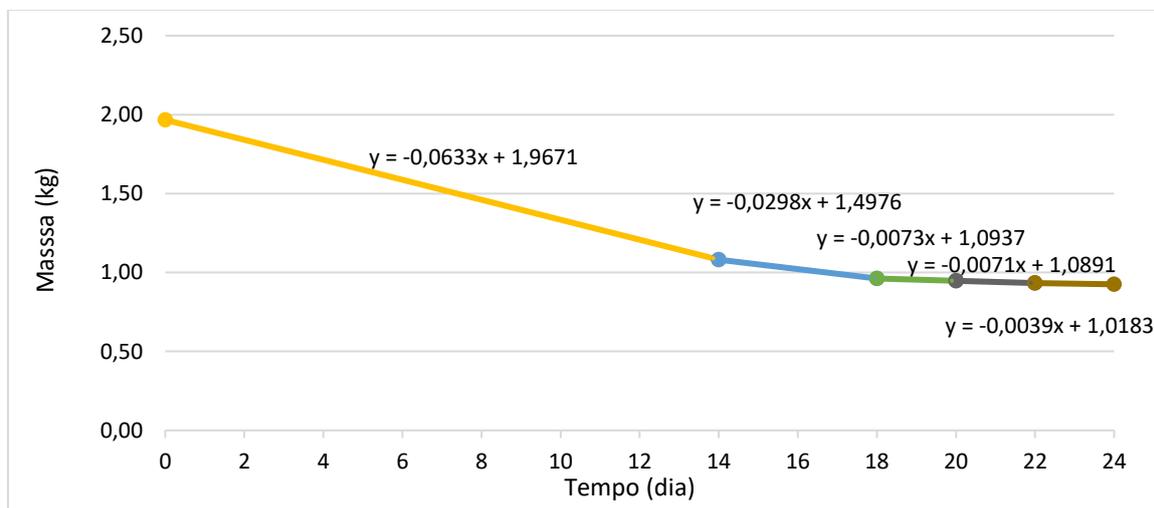


• **Ensaio 4**

Massa de U

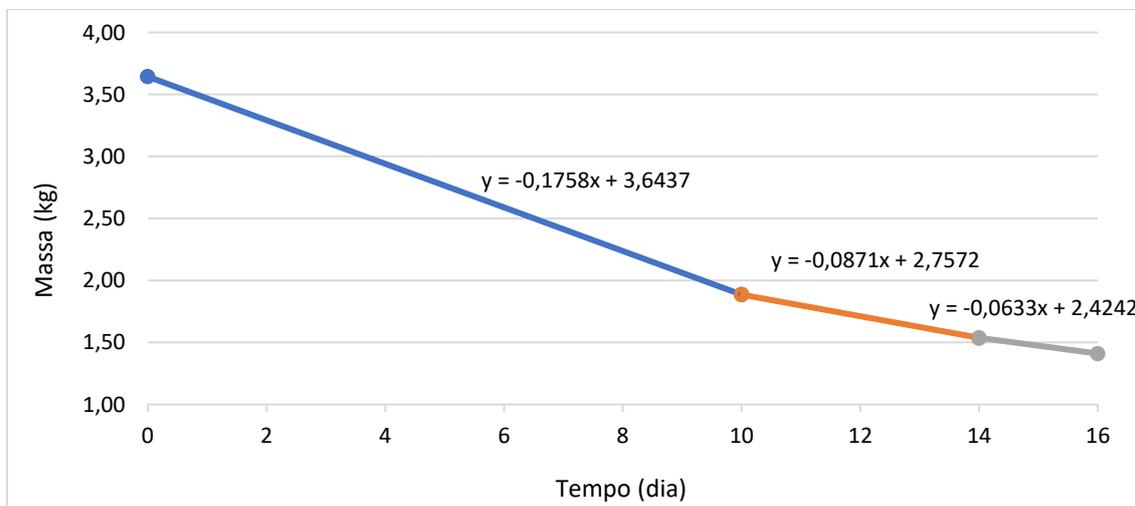


Massa de ST

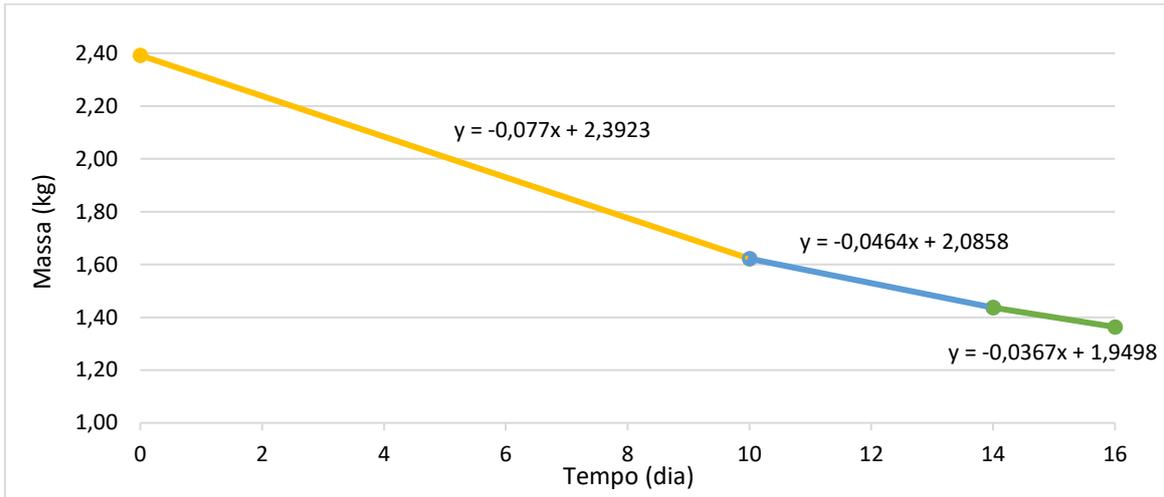


• **Ensaio 5**

Massa de U

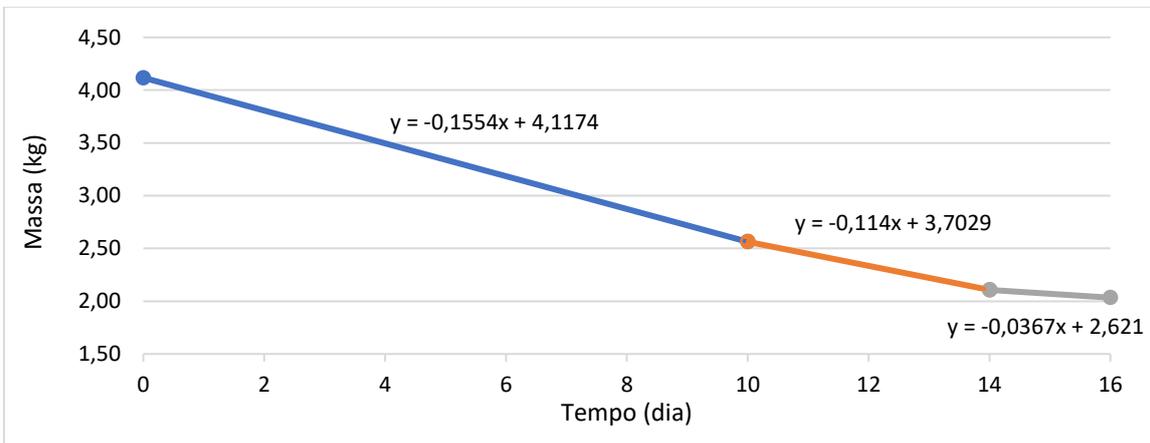


Massa de ST

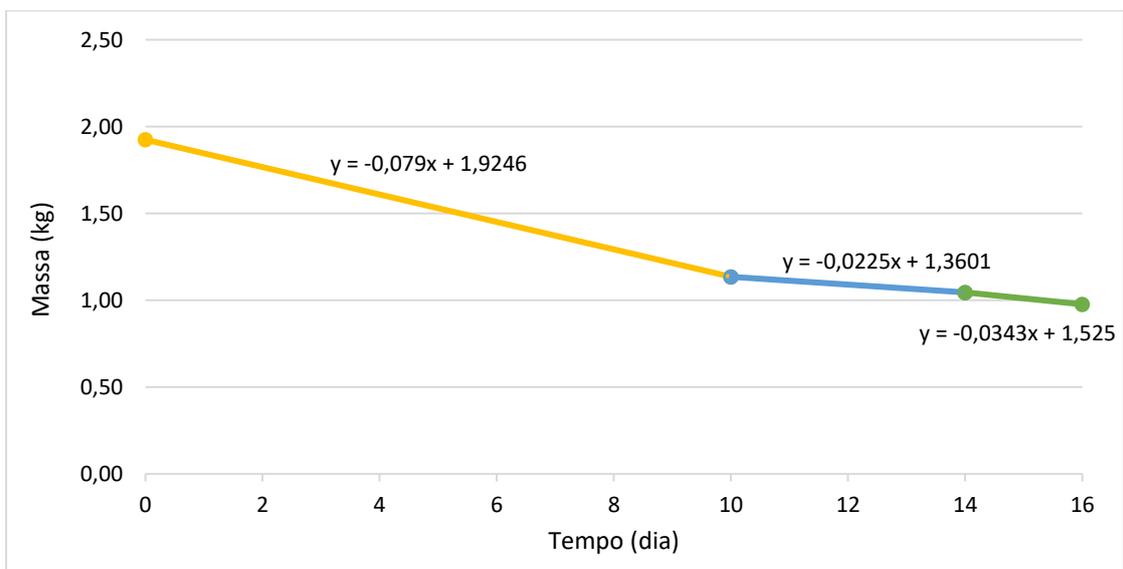


- **Ensaio 6**

Massa de U

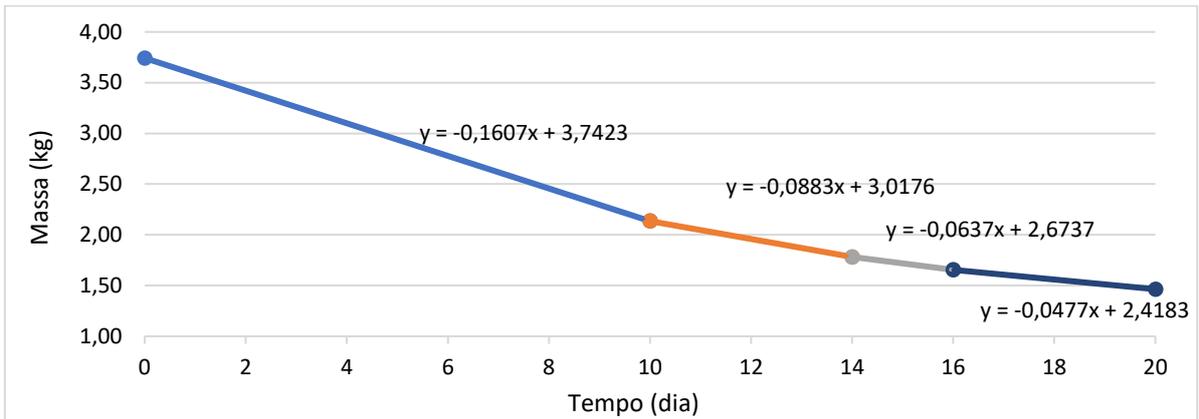


Massa de ST

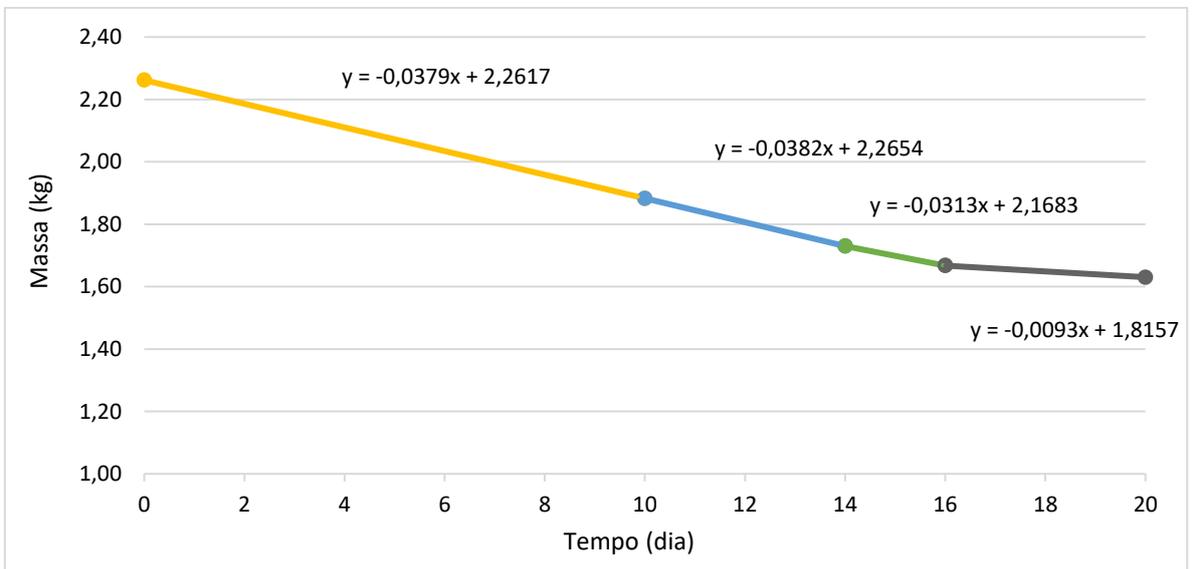


• **Ensaio 7**

Massa de U

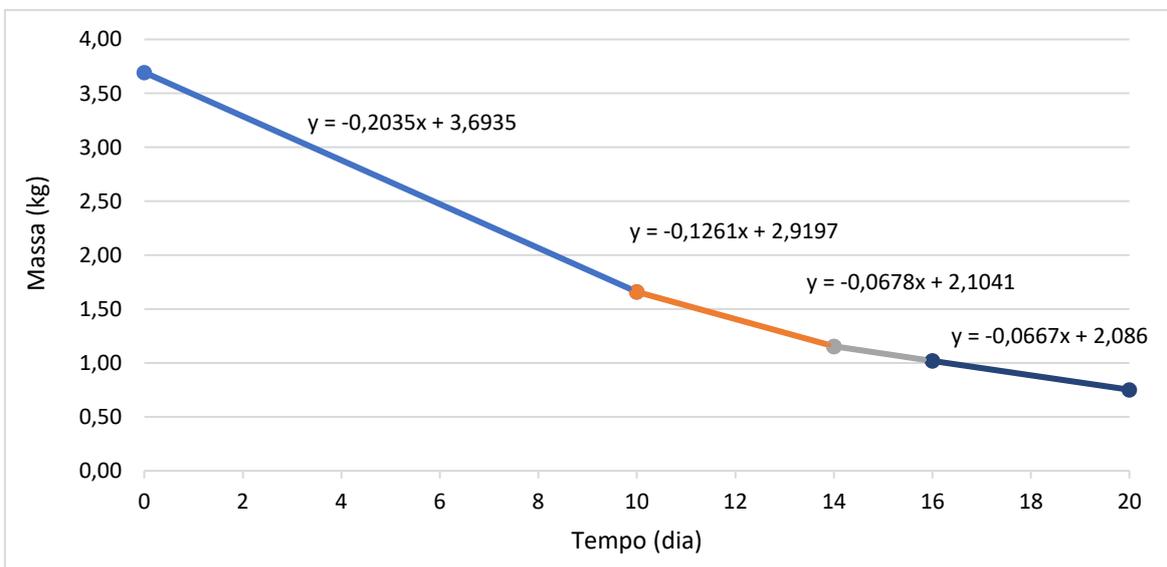


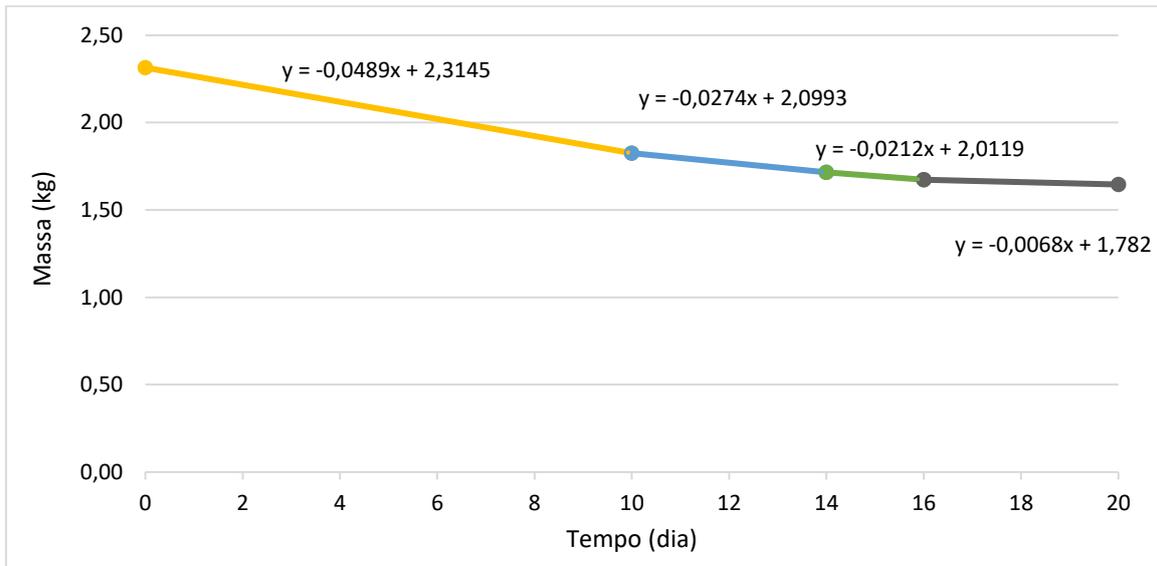
Massa de ST

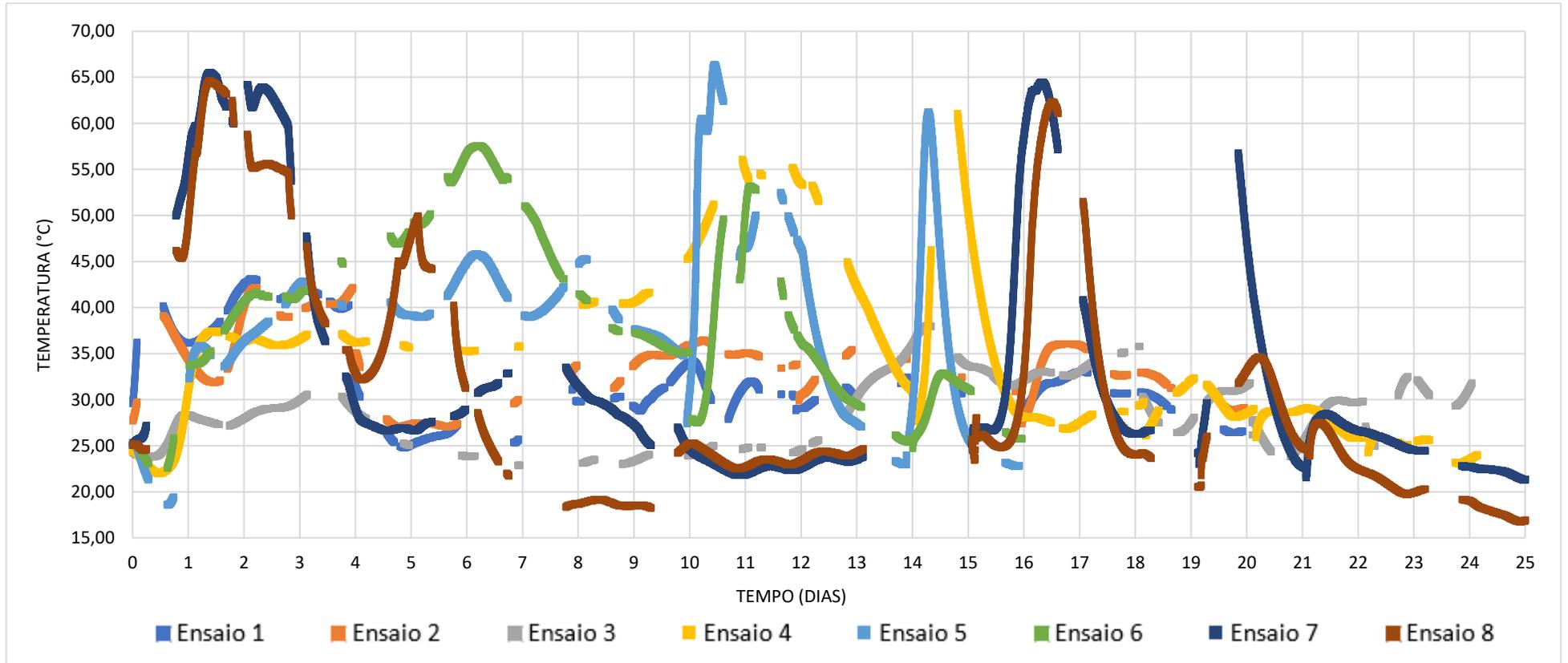


• **Ensaio 8**

Massa de U



Massa de ST

APÊNDICE B – Temperatura Registrada ao longo dos 8 (oito) ensaios de biossecagem

APÊNDICE C – Fotos da matriz inicial e final dos ensaios de biossecagem

- **Ensaio 1**

Matriz inicial



Matriz final



- **Ensaio 2**

Matriz inicial



Matriz final



- **Ensaio 3**

Matriz inicial



Matriz final



- **Ensaio 4**

Matriz inicial



Matriz final



- **Ensaio 5**

Matriz inicial



Matriz final



- **Ensaio 6**

Matriz inicial



Matriz final



- **Ensaio 7**

Matriz inicial



Matriz final



- **Ensaio 8**

Matriz inicial



Matriz final

