

3. Revisão Bibliográfica

3.1 – Caracterização dos Resíduos sólidos

Os resíduos gerados nos processos de tratamento de água e esgoto são constituídos por duas fases, uma sólida e a outra líquida apresentando o maior volume do mesmo resíduo. A água da fase líquida pode ser classificada em diferentes estados no lodo, Tsang e Vesilind apud Guohua et al. (2002) apresentam um modelo da distribuição das frações de água no lodo:

- Água Livre - Fração da água não associada às partículas sólidas do lodo e pode ser removida facilmente por sedimentação gravitacional;
- Água intersticial ou capilar - Fração da água ligada aos flocos do lodo, presente nos interstícios dos mesmos, podendo ser liberada pela quebra dos flocos mediante aplicação de força mecânica ou evaporação;
- Água Adsorvida - Camada de água formada na superfície das partículas sólidas do lodo, a qual é fortemente ligada por adsorção e adesão através das pontes de hidrogênio;
- Água de Hidratação - Fração da água quimicamente ligada à superfície das partículas sólidas.

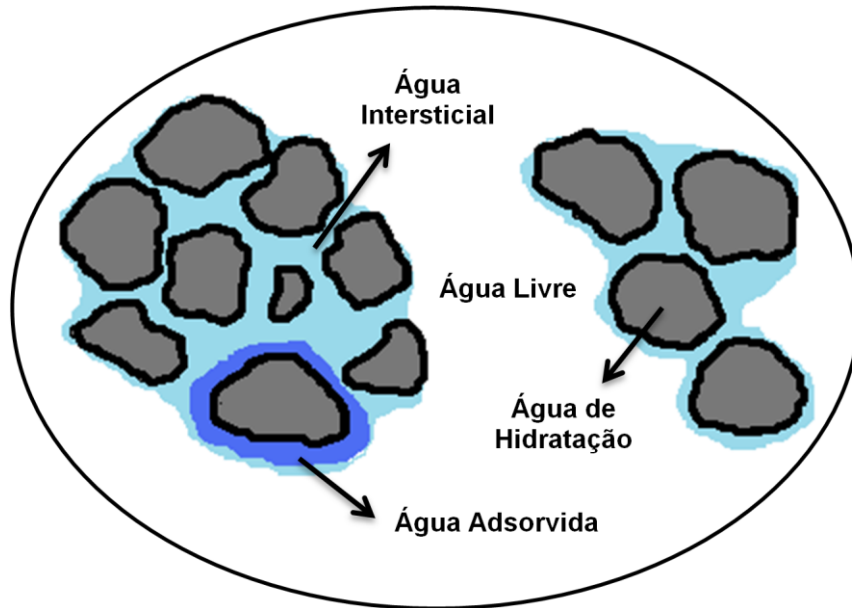


Figura 3.1 – Distribuição da água no lodo.
Fonte: adaptado de Guohua (2002).

A concentração de sólidos presentes nos resíduos e o volume de lodo gerados no processo de tratamento de água e esgoto é de fundamental importância na escolha dos tipos de tratamento e disposição destes resíduos.

3.2 – Processamento de Lodo

O processo de tratamento da fase líquida das estações gera como subproduto um material com elevado teor de umidade, sendo necessário a sua desidratação caso haja a necessidade de seu manuseio. O processo de remoção de água desse material deverá ser selecionado em função das suas características, bem como das exigências do local de sua destinação final. Os benefícios desse processo são: redução do seu volume; redução dos custos com transporte e; melhorar suas características físicas. A figura 3.2 apresenta a variação do volume do lodo em função do seu teor de água, pode-se observar pela curva que quando o teor de sólidos está muito baixo e qualquer elevação deste teor implica em uma redução expressiva do seu volume total.

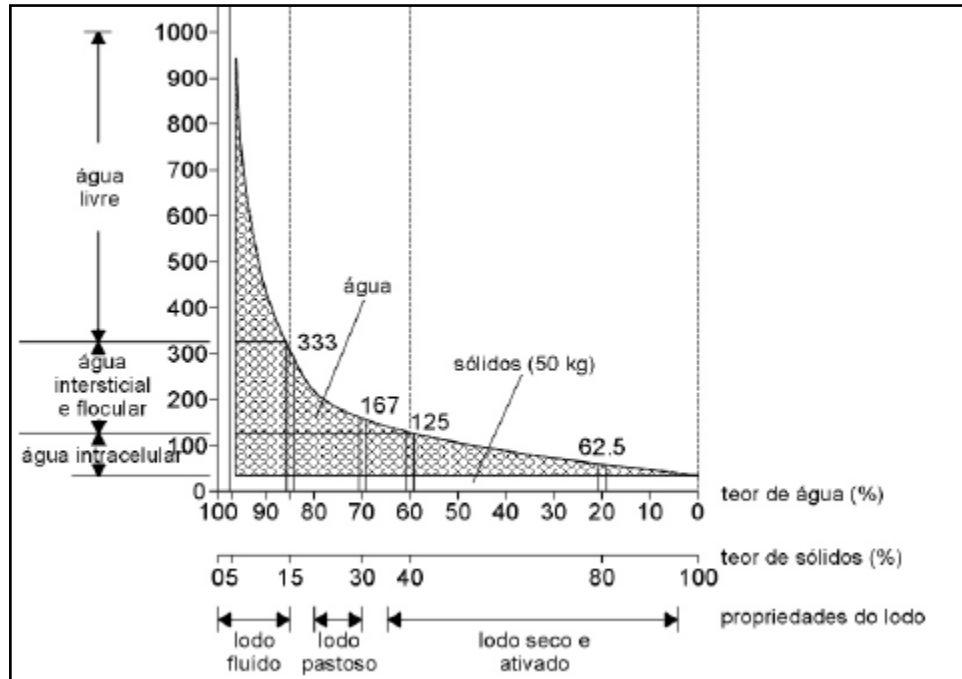


Figura 3.2 – Variação do volume de lodo em função do teor de sólidos

Fonte: adaptado SANEPAR (1999).

Estes resultados explicam o interesse das estações de tratamento na implantação de processos de desidratação do lodo.

3.2.1 – Processos de Adensamento de Lodo

A unidade de adensamento é geralmente o primeiro processo de tratamento dos resíduos gerados nas estações, e se caracteriza pela geração de lodo concentrado, conseqüentemente com menor volume. Neste processo geralmente o lodo recebe pequenas doses de polímero sintético, melhorando a eficiência do processo. A importância da etapa de adensamento se dá no aspecto técnico e econômico dos processos subsequentes, ou seja, com menor volume e maior concentração de sólidos dos lodos gerados através do adensamento, menor a demanda de equipamentos de desagüamento e maior é a sua eficiência Culp et al. (1986) apud Reali (1999).

Segundo Reali (1999), as unidades de adensamento mais empregadas nas estações são constituídas de adensadores por gravidade, sendo o mais antigo e

utilizado pelas estações, e os adensadores por flotação (ar dissolvido), desenvolvido nos anos 80 possui maior eficiência e rendimento, obtendo lodo com teor de sólidos na faixa de 3-5%.

3.2.2 – Processos de Desaguamento de Lodo

a) Centrifugação.

A centrifugação é um processo de separação de fases (Líquida e sólida), cujos princípios básicos são similares a sedimentação de partículas sob ação da gravidade, porém este se dá mediante aplicação da força centrífuga (de 1.000 a 6.000 vezes a força gravitacional). A centrífuga mais comum utilizada nos processos de desaguamento dos lodos é a centrífuga decantadora de eixo horizontal (Reali, 1999), devido a sua facilidade de operação e boa consistência do lodo desidratado, na faixa de 20-30% de teor de sólidos.

b) Filtração Forçada

Segundo Reali (1999) o processo de desaguamento por filtração forçada pode ser classificado em três categorias:

- Filtro-prensa: O princípio de operação ocorre por meio da aplicação de pressões diferenciais em câmaras revestidas internamente por mantas filtrantes contendo lodo. Através da compressão do meio filtrante, o filtrado é removido e no interior da câmara forma-se uma torta com alto teor de sólidos. Conforme este princípio há dois tipos de filtro-prensa: filtro-prensa de placas e filtro-prensa de diafragma.
- Prensa Desaguadora: Este processo envolve dois tipos de operação, primeiro a drenagem gravitacional e segundo a compactação do lodo, podendo estes ocorrer entre esteiras ou correias.
- Filtro a Vácuo: O princípio de operação se baseia na aplicação de pressão negativa na seção interna de um tambor, disposto na horizontal dentro de

um recipiente contendo lodo, girando lentamente. A superfície do tambor é envolta por uma manta (meio filtrante), pela qual a água é drenada para o interior do tambor e os sólidos ficam retidos sobre a manta sendo removidos por raspadores.

Ressalta-se a importância de um bom condicionamento do lodo afluente para o bom desempenho do processo de desaguamento por filtração forçada.

3.2.3 – Processos de Secagem do Lodo

a) Leitos de Secagem.

Os leitos de secagem são utilizados para remoção de água livre presentes em lodos, adotados em regiões onde as condições climáticas são favoráveis ao processo de secagem natural e que possuam área disponível para sua implantação. Os leitos de secagem são tanques rasos, composto por uma camada suporte, meio filtrante e sistema de drenagem. A água drenada deve ser caracterizada, devido a presença de metais, cor, turbidez e valores elevados de DQO, porém há a possibilidade do retorno do drenado à entrada da estação, ou o seu reuso.

Segundo Reali (1999) este método de secagem é empregado em larga escala nos EUA, onde praticamente dois terços (2/3) das ETEs adotam este sistema. As vantagens e desvantagens da utilização do leito de secagem estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Vantagens e desvantagens do uso de leitos de secagem

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo de implantação • Processo de operação simples • Baixo consumo de energia • Baixo consumo de condicionantes químicos • Alta concentração de sólidos 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de grandes áreas • Necessidade de lodo pré-estabilizado • Influência dos fatores climáticos • Processo de remoção do lodo manual

Fonte: Water Pollution Control Federation apud Reali (1999)

A eficiência dos leitos de secagem está diretamente ligada a fatores como: características físico-químicas do material a ser desidratado, espessura da camada de lodo, teor de sólidos, tipo de lodo a ser desidratado, condicionamento do lodo, condições climáticas do meio e, características do meio filtrante.

Neubauer apud Reali (1999) realizou ensaios com estações-piloto de leitos de secagem utilizando lodo de ETA nos EUA, com variação da temperatura do ar entre 20 a 27°C e umidade de 72 a 93%. Os resultados obtidos demonstraram um período da taxa de descarga de drenagem de até 24 horas, e a secagem por evaporação levou até 72 horas.

b) Leitos de Secagem a Vácuo

Este sistema possui a mesma concepção de secagem dos leitos convencionais, porém, este aplica vácuo para ativar a operação de drenagem. É aplicada pressão negativa, através de bombas de vácuo, sob o meio filtrante do leito, removendo o filtrado para o poço de acumulação, até o ponto quando são formadas rachaduras na torta de lodo e perdendo assim o vácuo, então encerra o processo de drenagem. Esse sistema é recomendado para pequenas estações e locais onde há restrição de espaço físico.

c) Lagoas de Lodo

O sistema de secagem por lagoas é semelhante aos leitos de secagem, porém, a desidratação do lodo ocorre necessariamente pela evaporação, sendo o processo de drenagem limitado devido à permeabilidade do solo, não havendo nas lagoas meio filtrante. A altura da lagoa varia, sendo recomendando entre 0,7 a 1,4m de profundidade, mantendo uma distância segura do nível do lençol freático, de acordo com as legislações locais. Os fatores avaliados na implantação de lagoas, são: clima (Precipitação, temperatura, evaporação), permeabilidade do solo, características do lodo, profundidade da lagoa e área superficial.

Neubauer apud Reali (1999) analisou uma lagoa de lodo de ETA nos EUA com 2,10m de profundidade, e observou uma concentração média de sólidos de 1,7% na superfície e 14% no fundo, o sobrenadante apresentava turbidez de 10UT.

3.2.4 – Disposição Final do Lodo

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 1987a), classifica como resíduos sólidos os lodos provenientes de sistema de tratamento de água, não sendo permitido o seu descarte em corpos de águas naturais. Aboy apud Andreoli (2001) conduziu um trabalho de caracterização do lodo produzido na ETA São João/Navegantes, Porto Alegre, realizando testes de lixiviação e solubilização (ABNT, 1987b), classificando o lodo como resíduo classe II – não inerte.

A Lei nº 9.433/97 “Política Nacional dos Recursos Hídricos”, e a Lei nº 9605/98 “Crimes Ambientais”, criaram novas políticas no uso dos recursos hídricos, assim como, tornou crime ambiental, com pena de reclusão de cinco anos, o lançamento de resíduos sólidos em mananciais, até então, prática comum adotada pelas ETAs. Obrigando aos responsáveis dos sistemas de tratamento de água a adotarem nova postura com relação ao gerenciamento e a disposição final dos resíduos sólidos.

Após os processos de tratamento e desidratação do lodo, melhorando assim suas características e também reduzindo seu volume, para posterior destinação final. Pode-se citar as principais possibilidades:

- **Matéria prima:** Para reutilização do lodo pelas indústrias, Sartori e Nunes apud Andreoli (2001) conduziram ensaios geotécnicos do lodo da ETA Rio das Velhas, podendo ser classificado na categoria de siltes e argilas. O lodo tem sido empregado na fabricação de cimento, cerâmicas, pigmento para argamassa, entre outros.
- **Agricultura:** O lodo de ETA pode ser utilizado para fins agrícolas como adubo, apesar deste possuir menor índice de nutrientes (N:P:K) que o lodo

de esgoto. Outro fator importante também é presença de metais pesados no lodo, podendo causar impactos ambientais no sistema solo-planta.

- Solo: O lodo de ETA também pode ser utilizado na recuperação de áreas degradadas por atividades de mineração, porém, devido à composição do lodo deve-se ter um controle na sua aplicação, podendo alterar as propriedades estruturais dos solos.
- Aterro Sanitário: A codisposição do lodo de ETA em aterros sanitários pode afetar o processo de estabilização do mesmo, caso o lodo possua grande fração orgânica e baixo teor de sólidos.

3.3. Estudo de casos

A necessidade por busca de novas tecnologias que visem conciliar as condições climáticas locais com a viabilidade econômica, o estudo por novas técnicas na secagem do lodo é objetivo deste trabalho, com a utilização de leitos de secagem, e também de diversos outros, que utilizaram estufas.

3.3.1. Secagem de lodo na ETE – Franca em São Paulo

No Brasil Comparini (2001) foi um dos pioneiros a desenvolver um estudo com secagem de lodo da Estação de Tratamento de Esgoto de Franca – SP, utilizando estufa agrícola. A Estação utiliza o processo de tratamento convencional de lodos ativados para tratar esgoto doméstico, predominantemente.

O processamento da fase sólida (biossólido) na ETE, composto por lodo gerado nos decantadores primários e secundários, consiste nos seguintes tratamentos: Tanque de mistura de lodos; Adensador de lodos; Biodigestores; Desidratação do lodo. O sistema de desidratação (desaguamento) do lodo consiste de um filtro prensa de esteira (*belt press*) com adição de um polímero catiônico, o lodo desaguado apresenta teor de sólidos na faixa de 18 a 20%. O lodo produzido pela ETE são

dispostos em um aterro anexo à estação para posterior aplicação em áreas agrícolas.

Para a realização da pesquisa o lodo desaguado, antes disposto no aterro, foi espalhado em forma de leiras com altura que variavam entre 10 – 50cm no interior de uma estufa agrícola, coberta no teto e nas laterais com lona plástica translúcida e instalada em área com o piso em concreto cercado por uma mureta de tijolos, de modo a evitar o contato e a interferência de água de chuvas, do lençol freático e/ou, de escoamento superficial.

A pesquisa se deu em três ciclos, com períodos aproximados de até 3 meses cada, de forma abranger os diferentes climas do ano, abrangendo um período total que compreende entre as datas 23/10/2000 à 30/07/2001. A altura da leira do lodo bem como a frequência do seu revolvimento foram estabelecido de acordo com o critério de cada ciclo. O plano de amostragem compreendiam por amostras composta e homogêneas por 4 amostras simples, coletadas em posições e profundidades diferentes da leira, e realizadas quinzenalmente. Para a medição da temperatura do ar e do lodo foram instalados sensores dentro e fora da estufa e também no interior da leira.

Os resultados obtidos na pesquisa foram bastante expressivos, atingindo níveis de teores de sólidos até 90% no lodo em até aproximadamente 70 dias de períodos de secagem. Com relação à utilização da estufa, a mesma mostrou-se bastante eficiente apresentando sempre temperaturas médias do meio interno da estufa superior as do meio externo. A pesquisa desenvolvida por Comparini (2001) serviu como base para diversas outras pesquisas nesta área, inclusive esta aqui apresentada.

3.3.2. Secagem de lodo da ETE – Araças em Espírito Santo

Lima (2009) também desenvolveu uma pesquisa com secagem de lodo por meio de estufa agrícola. Seguindo a pesquisa de Comparini (2001) como base, neste

trabalho foi utilizado lodo gerado da Estação de Tratamento de Esgoto de Araças, localizada no município de Vila Velha – ES, que utiliza o tratamento de lodos ativados convencional. O tratamento da fase sólida consiste das seguintes etapas: digestor; adensador e; desaguamento mecânico. Nesta etapa antes do lodo ser encaminhado para as centrífugas, ele é condicionado com polímero catiônico, e segundo dados do projeto o lodo desaguado atinja teor de sólidos de 25%. No fim o lodo é armazenado em contêiners para posterior disposição em aterros sanitários.

O lodo desaguado extraído das centrífugas, com 18% ST, foi disposto em forma de leiras no interior da estufa, seguindo os padrões adotados por Comparini (2001). A pesquisa foi realizada em duas etapas: a primeira utilizou lodo estabilizado e a segunda utilizou lodo não estabilizado, e cada etapa foi dividido em três ciclos. A metodologia com relação a altura das leiras e a frequência do revolvimento do lodo foi a mesma entre as duas etapas, porém, distinguindo entre os ciclos, para cada foi adotada um critério, cuja altura da leira e a frequência do revolvimento do lodo variou de acordo com o seu TS. As amostras do lodo coletado foram compostas por oito alíquotas simples, extraídas de posições e profundidade das leiras, cuja frequência das análises de ST se dava uma vez por semana.

O teor de sólido final do lodo obtido na pesquisa variou de acordo com critérios adotados em cada ciclo, e que os fatores preponderantes na eficiência da secagem do lodo foram a menor altura da leira e a maior frequência do revolvimento da mesma.

O uso de estufas agrícolas na secagem de lodo tem se apresentado como uma alternativa viável em comparação a outras tecnologias de maior custo, como por exemplo a secagem térmica. Porém para a implantação das estufas de secagem, há uma demanda de espaço físico considerável e também de regiões com o clima favorável, o que em alguns países estes são fatores limitantes. Diante destes desafios pesquisas visando melhorias no processo de secagem das estufas foram desenvolvidas.

3.3.3. Secagem de lodo da ETE – Bursa na Turquia

Na busca do aprimoramento das estufas agrícolas Salihoglu et al (2007) desenvolveram uma planta piloto na Estação de Tratamento de Esgoto localizado na cidade de Bursa na Turquia. A estufa possui 10m² de área, altura de 2,5m, e foi toda revestida por um filme plástico transparente, a planta foi equipada com sistemas:

- Aeração Superficial do Lodo - Foram montados um ventilador no teto e dois exaustores acima da porta para circular e renovar o ar no interior da estufa.
- Aquecimento do piso - Do lado externo da planta foram montados painéis de aquecimento solar, os quais aquecem a água que circula dentro de tubos que atravessam o leito de brita localizado abaixo do piso de concreto impermeável da planta, além de exaustores instalados na base para recircular o ar saturado no interior do leito de brita.

O lodo utilizado na pesquisa foi estabilizado e desaguado em filtro prensa de esteira com 20% TS, gerado na própria ETE onde foi instalada a planta piloto. A altura de 25cm da camada da leira foi fixa e com uma frequência do revolvimento de duas vezes por dia.

Os parâmetros medidos foram o TS do lodo e as condições climáticas do local, como; Precipitação (mm); Radiação solar (W/m²); Temperatura do ar (°C); Umidade do ar (%) e; velocidade do vento (m/s). O lodo atingiu TS de 75% no fim do ciclo de secagem de 30 dias. A planta piloto permitiu gerar uma diferença entre a temperatura do ar interna em média de 11% superior a temperatura externa.

3.3.4. Secagem de lodo da ETE- Xanthi na Grécia

Na cidade de Xanthi na Grécia, Mathioudakis (2009) desenvolveu uma pesquisa com secagem natural com lodo desaguado mecanicamente originário de ETE. A pesquisa foi desenvolvida em dois leitos de secagem em escala piloto revestidos

com lona plástica transparente, gerando o efeito de estufa, equipados com um sistema de ventilação interna, ventiladores e exaustores, para renovar o ar interno. Um dos leitos de secagem foi montado sobre cascalho equipado com um sistema de circulação de água aquecida por um painel solar. O lodo desaguado foi disposto em caixotes de 0,1m² da área por 0,25m de altura, sendo o mesmo revolvido manualmente uma vez por dia e pesado três vezes por semana. O tempo de secagem foi estabelecido pelo peso constante do lodo, assim que duas pesagens consecutivas fossem semelhantes, considerava-se o processo de secagem encerrado. O processo de secagem abrangeu os períodos de outono e inverno, afim de obter uma relação da eficiência de secagem do lodo em diferentes condições climáticas, para tal foram monitorados: temperatura do ar; radiação solar; umidade relativa do ar; precipitação e; velocidade do vento. A pesquisa obteve resultados significativos, com redução da umidade do lodo de 85% para 6% em um período de até 7 dias durante o verão.

3.3.5. Secagem de lodo da ETE de indústria farmacêutica em Teerã

Os leitos de secagem natural por percolação, como mencionado no item 3.3.a, são um dos processos de secagem do lodo mais comum utilizados pelas estações de tratamento em geral. Merdadi et al. (2007) relatou que mais de 6.000 estações de tratamento de esgoto utilizam leitos de secagem natural por percolação para tratamento do lodo gerado nas estações, eles desenvolveram uma pesquisa utilizando dois leitos de secagem por percolação típicos, em um deles cobriu com vidro transparente e pintou as paredes interna do leito com tinta preta para evitar a reflexão da luz e absorver a energia da radiação. O lodo utilizado na pesquisa foi recolhido de um decantador secundário de lodos ativados de uma estação de tratamento de indústria farmacêutica. Os aspectos avaliados no processo de secagem foram:

- Tipo do lodo - O lodo digerido apresentou melhor eficiência tanto na drenagem do percolado quanto na secagem do lodo por evaporação, comparado ao lodo bruto com alto teor de graxa e gordura;

- Teor de sólido inicial do lodo - O lodo adensado foi preferido ao lodo bruto, devido a menor quantidade do percolado gerado, e assim evita a colmatação do meio filtrante do leito de secagem;
- Altura da camada do lodo - A altura da camada analisada variou de 150mm à 350mm. Considerando-se a eficiência na secagem do lodo e viabilidade de aplicação dada a quantidade de lodo, a camada com 200mm apresentou melhores resultados;
- Condições climáticas – Observou-se que a chuva afetou o desaguamento do lodo quando o mesmo ainda apresentava umidade alta.

Os resultados da pesquisa demonstraram que nos 4 primeiros dias de ensaio a maior perda de umidade do lodo foi devido a drenagem do percolado, e o leito de secagem coberto apresentou melhor eficiência, aproximadamente TS 9% maior comparado ao leito convencional para um mesmo período. A taxa de aplicação de lodo no leito coberto foi superior ao do leito aberto, foram 138,5 kg lodo/m²/ano e 99,5 kg lodo/m²/ano respectivamente.

3.3.6. Secagem de lodo de ETE na Alemanha

Os leitos de secagem natural são indicados para regiões tropicais onde o clima local apresenta condições favoráveis para sua implantação, como: alta temperatura do ar, média acima de 20°C; baixa umidade do ar, média abaixo de 70%; forte radiação solar, média acima de 200kW/m²; alta velocidade do vento, média acima de 2m/s e; baixa precipitação, média mensal abaixo de 70mm. As regiões mais ao extremo norte e sul do globo, não apresentam tais condições favoráveis para a implantação do leito de secagem, ou até as estufas não apresentam ser tão vantajosas para sua utilização em grandes escalas. Por outro lado os secadores térmicos comumente utilizados para a secagem do lodo consomem muita energia elétrica, tornando-se um processo oneroso para estação de tratamento, Bux et al. (2002) em associação com a *Thermo-System* desenvolveram e implantaram um leito de secagem totalmente automatizado numa pequena estação de tratamento de esgoto, atendendo 1000 habitantes, localizada no sul da Alemanha.

O leito de secagem foi concebido no melhoramento de uma estufa agrícola, construído sobre piso cimentado adaptado com um sistema de drenagem integrado por canaletas permitindo a drenagem do percolado do lodo, quando este não for desaguado. As paredes e teto do leito foram revestidos com uma lona plástica transparente isolante com três camadas de bolhas de ar de alta resistência e transmissividade da radiação. O leito foi equipado com um misturador elétrico automático, podendo revolver o mesmo lodo até 12 vezes por dia, foi montado um sistema de ventilação para gerar turbulência do ar saturado na camada da superfície do lodo, e de exaustores para a renovar o ar saturado no interior do leito, foram instalados também aberturas nas paredes com portas automáticas que permitem a entrada do ar externo. O processo de operação do leito é todo automatizado, todos os componentes estão ligados a um microprocessador que controla o seu funcionamento, o qual por sua vez recebe dados a cada segundo dos sensores que medem os parâmetros relevantes do processo como: Temperatura do ar e do lodo; umidade do ar interno e externo do leito; radiação solar global; velocidade do vento e; o teor de umidade do lodo.

O Leito de secagem foi dividido em dois compartimento, um recebeu lodo bruto não tratado e o outro recebeu lodo condicionado com floculante, ambos com 3% teor de sólidos, enquanto o lodo condicionado levou 64 dias para atingir um teor de sólidos de 93%, o lodo bruto precisou de 83 dias para obter o mesmo valor. Analisou o consumo de energia utilizada na secagem do lodo bruto e o floculado e obteve um consumo de 28 kWh por tonelada de água evaporada do lodo bruto e 22kWh para o lodo floculado. Comparado ao 70 – 110kWh por tonelada consumido nos secadores térmicos, foi considerado satisfatório o desempenho do leito.

3.3.7. Utilização da Modelagem Matemática na predição do TS do lodo.

O processo de secagem térmica do lodo é um processo complexo, o qual envolve os fenômenos de transferência de calor e massa simultaneamente. Muitas pesquisas vem sendo desenvolvida em laboratórios com túnel vento e também em experimentos em campo com leitos de secagem. Gharaibeh et al. desenvolveu um modelo matemático para predizer o TS do lodo ao longo do período de secagem em

função das condições climáticas do meio externo, como: temperatura ambiente; temperatura da superfície do lodo; radiação solar; umidade do ar; e velocidade do vento. O modelo foi desenvolvido baseando-se nos conceitos de balanço de energia, utilizando os princípios de transferência de calor e massa por radiação, convecção e evaporação, considerando a área do leito de secagem e a altura do lodo como parâmetros do volume de controle. A função do modelo é quantificar o volume de água que evapora do lodo base úmida e conseqüentemente determinar o TS do lodo. Eles validaram o modelo comparando com os resultados obtidos em ensaios de secagem realizados em túnel de vento e também em campo com leitos de secagem, obtendo resultados satisfatórios.