

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE – UNIVILLE
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

**ESTUDO PRELIMINAR PARA O APROVEITAMENTO DE CALOR
RESIDUAL INDUSTRIAL PARA SECAGEM DE LODO TÊXTIL**

JOSIANE DE OLIVEIRA HAAG

JOINVILLE

2017

JOSIANE DE OLIVEIRA HAAG

**ESTUDO PRELIMINAR PARA O APROVEITAMENTO DE CALOR
RESIDUAL INDUSTRIAL PARA SECAGEM DE LODO TÊXTIL**

Dissertação apresentada à Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, para obtenção de qualificação no curso de Mestrado em Engenharia de Processos, na área de Tecnologias Limpas.
Prof^a Orientadora: Dra. Sandra Westrupp Medeiros

JOINVILLE

2017

Catalogação na publicação pela Biblioteca Universitária da Univille

H111e Haag, Josiane de Oliveira
Estudo preliminar para o aproveitamento de calor residual industrial para secagem de lodo têxtil/ Josiane de Oliveira Haag; orientadora Dra. Sandra Westrupp Medeiros. – Joinville: UNIVILLE, 2017.

80 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos – Universidade da Região de Joinville)

1. Resíduos industriais. 2. Lodo residual. 3. Indústria têxtil. 4. Calor residual. I. Medeiros, Sandra Westrupp (orient.). II. Título.

CDD 628.4

Termo de Aprovação

“Estudo Preliminar para o Aproveitamento de Calor Residual Industrial para Secagem de Lodo Têxtil”

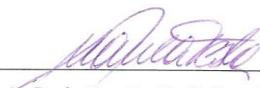
por

Josiane de Oliveira Haag

Dissertação julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos, área de concentração Engenharia de Processos e Tecnologias Limpas e aprovada em sua forma final pelo Programa de Mestrado em Engenharia de Processos.

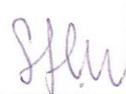


Prof. Dra. Sandra Helena Westrupp Medeiros
Orientadora (UNIVILLE)

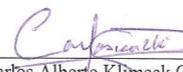


Prof. Dra. Ana Paula Testa Pezzin
Coordenadora do Programa de Mestrado em Engenharia de Processos (UNIVILLE)

Banca Examinadora:



Prof. Dra. Sandra Helena Westrupp Medeiros
Orientadora (UNIVILLE)



Prof. Dr. Carlos Alberto Klimeck Gouvêa
(UNISOCIESC)



Prof. Dra. Ana Paula Kurek
(UNIVILLE)

Joinville, 06 de setembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai, Luiz Alberto (*in memoriam*), que apesar de ter partido tão cedo deste mundo me deixou várias lições, entre elas, sempre buscar o conhecimento através da curiosidade e da leitura.

À minha mãe, Laura Maria, por ter sido pai e mãe por tanto tempo e por me ensinar que ao enfrentar dificuldades nos tornamos mais fortes.

Ao Fábio Sölter, meu marido, pelo apoio e amor de sempre, que me renovam a cada dia.

Ao meu filho, Henrique, que mesmo tão jovem, me enche de orgulho.

Às minhas irmãs, Lisiane, Karina e Larissa pelo exemplo de luta e perseverança.

Aos meus sogros, Dirk e Maria da Graça, por sempre acreditarem em mim e me darem apoio em minha trajetória profissional.

Aos meus amigos e minha família, pelo apoio e pela compreensão de minha ausência, devido aos estudos demandados para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores que fazem parte deste programa, pois mesmo nos temas mais complexos tiveram a sabedoria de transmitir seus ensinamentos da maneira mais agradável possível.

À professora Sandra Helena Westrupp Medeiros, pela paciência e pelo apoio durante todas as fases de desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Ozair Souza, Ana Paula Pezzin e Adelar Ferreira Novais pela parceria e ajuda, sempre que necessário.

Às analistas químicas, Cláudia Hack e Ana Paula Pereira e ao estagiário, Lucas Langsch, pela ajuda e dedicação.

À empresa parceira, Menegotti Malhas, em especial ao engenheiro Waldecir Berns, por ter nos proporcionado o desenvolvimento deste trabalho.

À empresa parceira Albrecht Equipamentos Industriais, em especial ao Sr. Waldir Albrecht e ao engenheiro Ruchele Souza, pelo grande apoio técnico.

Ao engenheiro Alexandre Leminsz pelo grande auxílio técnico.

À FAPESC, pelo apoio financeiro.

Aos meus colegas de turma, pelo grande apoio durante as disciplinas e pelas amizades verdadeiras que se formaram entre nós, a partir deste curso.

“Quando uma criatura humana desperta para um grande sonho e sobre ele lança toda a força de sua alma, todo o universo conspira a seu favor.”

(Johann Goethe)

RESUMO

O tratamento térmico, a exemplo da secagem de lodo, tem sido visto como forma de redução no volume de sólidos, permitindo um lodo mais manejável e promovendo a redução nos custos com seu transporte e disposição em aterros. Em uma empresa do ramo têxtil, procurou-se secar o lodo gerado pela ETE, realizando experimentos de secagem em um secador de leito fixo, para reduzir o teor de umidade final, com temperatura e velocidade do ar iguais a 90° C e 5 m/s, respectivamente. Avaliou-se a possibilidade de secagem de 5 toneladas de lodo, gerados diariamente na ETE, com aproximadamente 80% de umidade, após processo de deságue em centrífuga, com o uso dos gases residuais gerados por um aquecedor de fluido térmico. Mediante a realização de balanço de energia foi analisada viabilidade econômica com o aproveitamento do calor residual, considerando-se, principalmente, os custos com transportes e destinação final do resíduo em aterro industrial. Com os experimentos de secagem, foi possível alcançar 5% de teor de umidade final no lodo. Durante a secagem, foi observada a formação de fissuras e “pele”, as quais interferem no processo de eliminação da água presente no material. A partir da análise dos gases residuais do aquecedor de fluido térmico e da verificação da quantidade real de calor para a secagem do lodo gerado pela empresa, foi possível concluir que o calor residual pode ser aproveitado para a secagem de todo o lodo. Além disso, a partir da construção de dois cenários, para regime de secagem de 8 e 24 horas, com uso de secador de tambor rotativo que utiliza calor residual, analisou-se a viabilidade econômica para a operação destes equipamentos. O regime de 24 horas de operação do secador se mostrou mais vantajoso, sendo o retorno do investimento em 22 meses.

Palavras-chave: lodo têxtil, secagem de lodo, calor residual.

ABSTRACT

Thermal treatment, such as sludge drying, has been seen as a way to reduce the volume of solids, allowing a sludge that is more manageable and promoting the reduction of costs with its transportation and disposal in landfills. In an attempt to dry the sludge generated by the effluent treatment plant (ETP) of a textile company, drying experiments in a fixed bed dryer were conducted to reduce the final moisture content, with temperature and air velocity equal to 90°C and 5 m/s, respectively. The possibility of drying 5 tons of sludge generated daily in the ETE was evaluated, using approximately 80% humidity, after centrifugation process with the use of the residual gases generated by a thermal heater. By means of the realization of energy balance, economic feasibility was analyzed with the utilization of the residual heat, considering, mainly, the transportation costs and final destination of the waste in industrial landfill. With the drying experiments, it was possible to reach 5% of final moisture content in the sludge. During the drying process, the formation of cracks and "skin" was observed, which interferes with the process of elimination of the water present in the material. From the analysis of the residual gases of the thermal fluid heater and the verification of the actual amount of heat for the drying of the sludge generated by the company, it was possible to conclude that the residual heat can be used for the drying of the whole sludge. In addition, from the construction of two scenarios, for a drying regime of 8 and 24 hours, using a rotary drum dryer that uses residual heat, the economical feasibility for the operation of these equipments was analyzed. The 24-hour operation of the dryer proved to be more advantageous, with a return on investment of 22 months.

Keywords: textile sludge, sludge drying, residual heat.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. A porcentagem da concentração total possível de sólidos secos, obtida pelos processos de espessamento, desidratação e secagem.	21
Figura 2. Imagem de corte de partícula de lodo mostrando a formação da “pele” ..	22
Figura 3. Classificação de secadores contínuos	24
Figura 4. Esquema de aparato experimental.....	26
Figura 5. Fluxograma para a seleção de secadores contínuos	28
Figura 6. Fluxograma de seleção de secadores pelo método de Baker e Labadibi	30
Figura 7. Aspecto visual das amostras de lodo antes da secagem. Primeiro ensaio (à esquerda) e segundo ensaio (à direita).	37
Figura 8. Bancada de secagem em leito fixo e seus principais componentes.	38
Figura 9. Diagrama de operação de um processo de secagem térmica.	40
Figura 10 – Fluxograma representando a secagem por meio de calor residual	40
Figura 11 - Curvas termogravimétricas e derivadas das três amostras de lodo. Curvas TG (em verde) referente à perda de massa em função da umidade e curvas DTG (em azul) referentes ao pico endotérmico.....	46
Figura 12. Curva de velocidade de secagem para os ensaios 1 e 2, representadas em kg vapor/kg ar seco na saída do secador em função do tempo em minutos. ...	47
Figura 13. Redução de volume das amostras ao longo da secagem.....	49
Figura 14. Amostras de lodo antes e após secagem: (a) em laboratório e (b) na indústria.....	50
Figura 15. Escolha do secador pelo método de Van't Land	54
Figura 16. Balanço de massa no regime de funcionamento de maior viabilidade econômica	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados das amostras de lodo têxtil antes da secagem.....	37
Tabela 2. Dados do lodo têxtil coletados antes e após a secagem.....	48
Tabela 3. Características da corrente gasosa de exaustão do aquecedor de fluido térmico.	51
Tabela 4. Dados dos secadores selecionados para as situações de secagem propostas.	55
Tabela 5. Custo mensal com a destinação do lodo úmido.....	56
Tabela 6. Custo mensal com a destinação do lodo seco para o regime de secagem de 8 e 24 horas por dia, economia gerada com o uso de calor residual e retorno do investimento.....	57

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Análise do lodo da ETE	69
Anexo 2. Laudo do aquecedor de fluido térmico	72
Anexo 3. Carta psicrométrica para altas temperaturas	73
Anexo 4. Dados do secador de leite fixo utilizado no experimento	74
Anexo 5. Tabela de calor específico do ar a diferentes temperaturas.....	75
Anexo 6. Memorial de cálculo	76

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
1. OBJETIVOS	16
1.1. OBJETIVO GERAL	16
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 LODOS INDUSTRIAIS.....	17
2.1.1 Lodo Têxtil	18
2.2 DESÁGUE DE LODOS INDUSTRIAIS	19
2.3 SECAGEM DE LODOS INDUSTRIAIS	20
2.3.1 Temperatura e velocidade de secagem em lodos industriais.....	23
2.3.2 Tipos de secadores	23
2.3.3 A escolha do secador.....	27
2.4 USO DE CALOR RESIDUAL PARA A SECAGEM DE LODO TÊXTIL.....	31
3. METODOLOGIA	35
3.1 COLETA DOS DADOS.....	35
3.4 CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO LODO TÊXTIL DURANTE SECAGEM.....	37
3.5 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CALOR NECESSÁRIA PARA A SECAGEM DO LODO PRODUZIDO NA EMPRESA.....	39
3.5.1 Cálculos da quantidade necessária de energia para a secagem	40
3.6 CÁLCULO DA QUANTIDADE DE CALOR DISPONÍVEL NO AQUECEDOR DE FLUIDO TÉRMICO	42
3.7 ESCOLHA DO SECADOR	43
3.8 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA AS SITUAÇÕES PROPOSTAS CONSIDERANDO-SE OS CUSTOS JÁ EXISTENTES COM A DESTINAÇÃO DO LODO.....	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1 CARACTERÍSTICAS DO LODO INDUSTRIAL TÊXTIL.....	46
4.2 RESULTADOS DOS TESTES DE SECAGEM EM LEITO FIXO.....	47
4.3 CARACTERÍSTICAS DA CORRENTE DE EXAUSTÃO DO AQUECEDOR DE FLUIDO TÉRMICO.....	51

4.4 TAXA DE SECAGEM NECESSÁRIA PARA A VAZÃO DE LODO NA EMPRESA.....	51
4.5 QUANTIDADE DE CALOR DISPONÍVEL NO AQUECEDOR DE FLUIDO TÉRMICO PARA APROVEITAMENTO COM A FINALIDADE DE SECAGEM DO LODO	52
4.6 ESCOLHA DO SECADOR	53
4.7 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA OS CENÁRIOS PROPOSTOS.....	55
4.8 BALANÇO DE MASSA COM O USO DO SECADOR SELECIONADO.....	58
CONCLUSÃO	Erro! Indicador não definido.
REFERÊNCIAS.....	..62

INTRODUÇÃO

A indústria têxtil teve início no Brasil ainda no período colonial e cresceu progressivamente a partir do início do século XX, solidificando-se na década de 40 (KOAN E CON, 2005).

O setor têxtil brasileiro apresenta um faturamento anual de US\$ 53 bilhões, com 30 mil empresas, 1,7 milhão de empregados diretos e 8 milhões indiretos, dos quais 75% são de mão de obra feminina. Apresenta-se como o 2º maior empregador da indústria de transformação, perdendo apenas para alimentos e bebidas. O Brasil é o quinto maior produtor têxtil do mundo e representa 16,4% dos empregos e 5,5% do faturamento da indústria de transformação (PRADO, 2013).

A importância desse segmento industrial também chama a atenção quanto aos aspectos ambientais relacionados com esta atividade, sendo que dentre esses principais problemas, segundo Carreira (2006), estão a inertização e a disposição do lodo gerado.

O gerenciamento dos lodos industriais representa um grande investimento devido aos altos custos operacionais. O capital associado e os custos de operação podem alcançar a ordem de 25 a 50 % do custo total do processo de tratamento de águas residuais, sendo a desidratação de lodo um gargalo nos sistemas de tratamento (ZHANG, 2006).

O desaguamento ou desidratação consiste na redução do teor de umidade do lodo e, por conseguinte, na elevação da concentração de sólidos totais. O teor de sólidos a ser alcançado ao final do processo de desidratação e o tempo necessário para atingir esse teor dependem do tipo de lodo a ser desaguado e do processo utilizado.

O tratamento térmico para a secagem de lodo tem sido visto como forma de redução do conteúdo de umidade do lodo industrial e, conseqüentemente, de obtenção de um produto estabilizado, permitindo um lodo mais manejável e redução nos custos com seu transporte e disposição em aterros (DOMINGUES *et al.*, 2004).

Entretanto, o processo de secagem térmica de lodo não é uma solução de baixo custo, principalmente, por causa de sua alta demanda energética, mas

pode ser viabilizado se houver uma fonte de energia "residual" que possa ser utilizada para esse fim (CHUN *et al.*, 2012).

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GERAL

Analisar a viabilidade de utilização de calor residual de corrente de exaustão, de aquecedor de fluido térmico na secagem de lodo industrial têxtil.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a secagem do lodo em um secador de leito fixo;
- Determinar a quantidade de calor residual disponível uma corrente de exaustão proveniente de um aquecedor de fluido térmico;
- Levantar algumas informações quanto ao lodo gerado pela empresa;
- Determinar a quantidade de energia necessária para a secagem de lodo industrial têxtil;
- Determinar o melhor tipo de secador em função das características do lodo;
- Analisar a viabilidade econômica e o tempo de retorno do investimento.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A crescente urbanização e industrialização gera, como consequência, um aumento significativo do volume de águas residuais produzidas em todo o mundo. Neste contexto, destacam-se as indústrias têxteis, grandes consumidores de águas em seus processos e, por conseguinte, produtores de águas residuais e grande volume de lodos, demandando por ações visando à redução da geração destes, bem como seu aproveitamento (ASIA *et al.*, 2006).

2.1 LODOS INDUSTRIAIS

A crescente concentração populacional em áreas urbanas gera o aumento da produção de resíduos domésticos e industriais, considerados um dos principais problemas ambientais tanto pela forma de disposição desses como pela possibilidade de contaminação de solos e águas subterrâneas (LAGO *et al.*, 2006).

Segundo a definição proposta pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na norma NBR 10004/2004, são considerados resíduos sólidos industriais (ABNT, 2004):

os resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades industriais, incluindo-se os lodos provenientes das instalações de tratamento de águas, aqueles gerados em equipamentos de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam, para isto, soluções economicamente inviáveis, em face da melhor tecnologia disponível.

Portanto, novas soluções em matéria de tratamento de lodos, gestão e utilização dos resíduos para alcançar padrões ambientais exigidos, consistem em uma demanda atual (CHUM *et al.*, 2012).

Dentre os vários segmentos produtivos que podem degradar a qualidade dos ambientes, se destacam as indústrias têxteis e papelarias, por gerarem grandes volumes de efluentes, com alta carga orgânica e demanda bioquímica de oxigênio, baixas concentrações de oxigênio dissolvido, forte coloração e pouca biodegradabilidade. Esses efluentes também possuem grande

propensão para alterar ciclos biológicos, devido a sua toxicidade e potencialidades carcinogênicas e mutagênicas (PEREIRA e FREIRE, 2005).

2.1.1 Lodo Têxtil

Segundo Dojcinovic *et al.* (2011), uma das principais fontes de corantes lançados no meio ambiente são de fábricas têxteis. Durante o processamento têxtil, a ineficiência dos processos de tingimento faz com que 10 a 15% dos corantes totais utilizados no processo sejam lançados diretamente em águas residuais, o que impõe forte pressão nessa tipologia industrial, muitas vezes considerada um dos maiores poluidores da água, levando em conta tanto o volume descarregado como a composição do efluente.

Chequer *et al.* (2013) afirmam que uma das tarefas mais difíceis enfrentada pelas estações de tratamento de águas residuais industriais têxteis é a remoção da cor presente nos compostos, principalmente, porque corantes e pigmentos foram concebidos para resistir à biodegradação, de tal forma que permanecem no ambiente durante um longo período de tempo.

Já Rosa (2004) descreve que o lodo industrial gerado na estação de tratamento de indústrias têxteis é analisado e classificado quanto à sua natureza e, posteriormente, enviado para destinação final, dentre a qual pode-se citar aterros sanitários/industriais, incineração, estabilização e, mais recentemente, disposição em terras cultiváveis.

Reda e Sato (2009) dizem que a disposição de lodos em aterros, seja lodos de tratamento ou codisposição com resíduos sólidos urbanos, é amplamente utilizada no Brasil. Esses locais são rigorosamente planejados, utilizam regras operacionais específicas e respeitam normas ambientais, de modo a garantir um confinamento seguro em termos de evitar a poluição ambiental e proteger a saúde pública.

Assim, em função da periculosidade oferecida por esses, para que possam ser descartados, a NBR 10004/2004 classifica o lodo gerado pela indústria têxtil como sendo Classe II A, não inertes, o que significa que este pode apresentar propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (ABNT, 2004).

2.2 DESÁGUE DE LODOS INDUSTRIAIS

A quantidade de água presente no lodo influi em suas características físicas e, conseqüentemente, em seu manuseio, volume e disposição final. As propriedades mecânicas do lodo estão diretamente relacionadas com seu teor de umidade e esta, por sua vez, tem uma relação direta com o teor de sólido (LOBATO, 2011).

Uma etapa anterior e extremamente necessária ao processo de desidratação é o estudo da distribuição dos diferentes tipos de água presentes no lodo, quais sejam:

- água livre: não está unida à partícula sólida e representa a maior quantidade em lodos. Pode ser removida por simples ação gravitacional;
- água intersticial ou capilar: está unida fisicamente por forças capilares;
- água superficial ou adsorvida: está adsorvida na superfície das partículas sólidas. Pode ser removida por força mecânica ou pelo uso de flocculante;
- água ligada: é a água de constituição da partícula. É parte da fase sólida e só pode ser removida através de forças térmicas que provoquem uma mudança no estado de agregação da água, isto é, através do congelamento ou evaporação.

As águas, intersticial e superficial, exigem forças consideravelmente maiores para serem separadas dos sólidos presentes no lodo. Estas forças podem ser de origem química, quando do uso de flocculantes, ou mecânicas, mediante a utilização de processos de desaguamento mecanizados, tais como filtros prensas ou centrífugas (ANDREOLI *et al.*, 2001).

A água ligada, em forma intercelular e em coloides, é parcialmente removível por desidratação mecânica, mas requer a adição de polímeros. A água intercelular é retida no lodo por ligação de hidrogênio, que pode ser quebrada pela adição de polieletrólitos que provocam uma alteração na tensão superficial. A mesma situação serve para água ligada. A água ligada intracelular só é possível remover se as paredes das partículas de lodo forem quebradas através de aquecimento, congelamento ou por forças eletro induzidas. Isso significa, por exemplo, que, sem secagem térmica, será impossível remover essa água presente no lodo.

As partículas que compõem os lodos interagem fortemente umas com as outras para evitar a sedimentação e oferecem uma resistência significativa à compressão e à filtração. Isto conduz à necessidade de remoção de água por forças compressivas aplicadas diretamente à fase sólida para auxiliar a quebra de fases e a desidratação deste material (WAKEMAN, 2007).

Ohm *et al.*, (2009) citam que a desidratação de lodos com elevado teor de água até um conteúdo de matéria seca de, aproximadamente, 10%, é sempre difícil por causa das características adesivas das lamas.

O conteúdo de umidade de um produto é a proporção direta entre a massa de água presente no material e a massa de matéria seca. O conteúdo de umidade é a quantidade de água, que pode ser removida do material sem alteração da estrutura molecular do sólido (PARK *et al.*, 2007).

Métodos e procedimentos para remoção de água são novas demandas em tratabilidade de lodos têxteis. As necessidades principais incluem a remoção de águas superficiais e intersticiais que proporcionem a redução do volume de lodo gerado.

2.3 SECAGEM DE LODOS INDUSTRIAIS

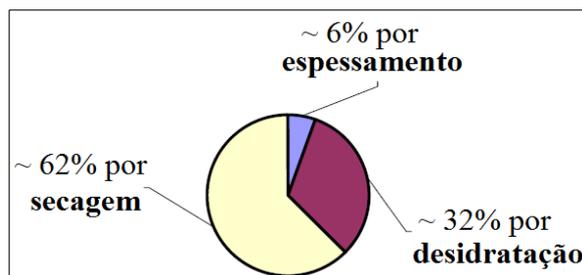
Park *et al.*, (2007) observam que dois fenômenos ocorrem simultaneamente quando um sólido úmido é submetido à secagem:

- a) transferência de energia (calor) do ambiente para evaporar a umidade superficial, a qual depende de condições externas de temperatura, umidade do ar, fluxo e direção de ar, área de exposição do sólido (forma física) e pressão;
- b) transferência de massa (umidade) do interior para a superfície do material e sua subsequente evaporação devido ao primeiro processo. O movimento interno da umidade no material sólido é função da natureza física do sólido, sua temperatura e teor de umidade.

Pode ser estimado que, se o objetivo for alcançar 90 % da concentração total possível de sólidos secos (SS), cerca de 6% pode ser removido por espessamento, 32% por desidratação e o restante, 62% da água presente no material, somente poderá ser removida por secagem térmica (BORK, 2011).

Portanto, se o teor de água presente nos lodos tem de ser diminuído para o mínimo (aproximadamente, 90% de sólidos secos), ou ainda, se há uma necessidade de se obter uma remoção de umidade mais elevada do que é garantido por desidratação mecânica, a secagem térmica se faz necessária, conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1. A porcentagem da concentração total possível de sólidos secos, obtida pelos processos de espessamento, desidratação e secagem.



Fonte: Bork (2011).

A redução do lodo é a última etapa do processo de tratamento de efluentes industriais. O tratamento térmico para a secagem de lodo tem sido visto como forma de redução para até 90% do conteúdo de sólidos e, conseqüentemente, de obtenção de um produto estabilizado, permitindo um lodo mais manejável e seu transporte sem grandes volumes de água (DOMINGUES *et al.*, 2004).

Bork (2011) diz que há dificuldade no processo de secagem quando o lodo se encontra entre 50 a 60% em massa de matéria seca, situação em que passa por uma fase aderente, não podendo, assim, fluir livremente.

Lobato (2011) descreve que, além da desidratação natural e mecânica, a secagem térmica do lodo surge como uma possibilidade de alcançar conjuntamente a redução da umidade do lodo e, conseqüentemente, seu volume, reduzindo dessa forma, os custos no seu transporte e disposição final. Esse tipo de processo surge também como uma alternativa de higienização do lodo, possibilitando o seu uso agrícola, quando proveniente de processo biológico.

As operações de secagem de lodo podem ser tanto diretas como indiretas. Fatores como, por exemplo, consumo de energia, tipo de equipamento utilizado, umidade inicial e final, são determinantes para o sucesso da operação de secagem do material (CHUN *et al.*, 2012).

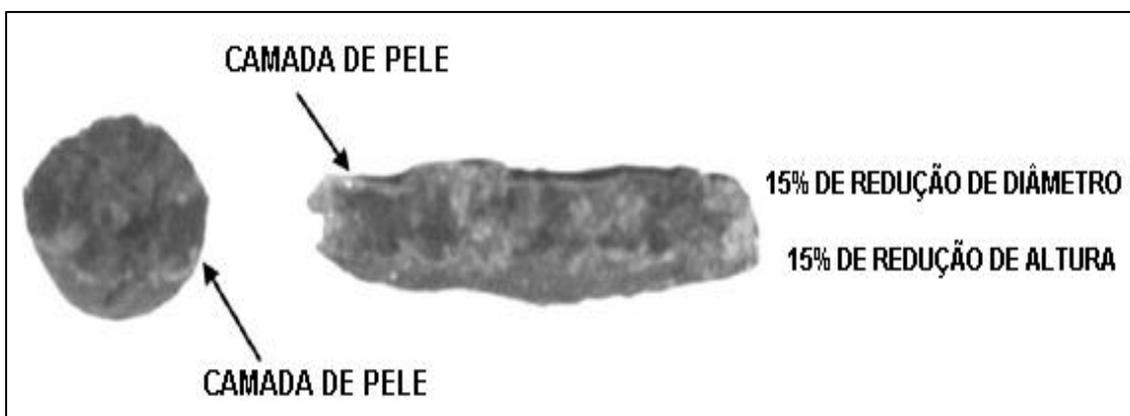
Deve-se lembrar que o processo de secagem térmica de lodo não é uma solução de baixo custo, principalmente, por causa de sua alta demanda energética, pelo menos, enquanto não houver nenhuma fonte de energia "residual" que possa ser reutilizada para isso (e.g., biogás, gases de combustão com elevada entalpia e baixa pressão de vapor). Por outro lado, é impossível obter um teor de massa seca significativa no lodo sem uma aplicação do processo de secagem, fato que está ligado aos diferentes tipos de água nos lodos, conforme supracitado (FLAGA, 2005).

Conforme Lobato (2011) existe inúmeros benefícios da aplicação de secagem para lodos industriais, com destaque para a substancial redução de volume e para a inativação dos patógenos, além da própria utilização do lodo seco como combustível.

Chen *et al.* (2012) garantem que o processo de secagem de lodo reduz a massa e o volume deste material, tornando sua armazenagem, transporte, envase e comércio mais fácil. Além disso, permite pirólise, gaseificação, combustão e a incineração deste lodo.

Font *et al.* (2010) estudaram os efeitos da formação de uma camada ao redor das partículas de lodo, denominada "pele". Conclui-se que há um efeito forte desta camada, a qual controla o processo de secagem, reduzindo as taxas de eficiência deste processo. O exame de amostras cortadas aponta que a pele rígida impede a formação de fissuras dentro das partículas de lodo, as quais promovem melhor secagem, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2. Imagem de corte de partícula de lodo mostrando a formação da "pele".



Fonte: Font *et al.* (2010).

Vega *et al.* (2014) realizaram experimentos de secagem de lodo com a adição de ácidos inorgânicos combinados (cloreto de ferro e óxido de cálcio) ao lodo a ser seco, obtendo resultados positivos na redução da emissão de compostos de enxofre, causadores do mau odor.

2.3.1 Temperatura e velocidade de secagem em lodos industriais

Arlabosse *et al.*, (2005) concluíram que são encontradas dificuldades importantes ao determinar as isotermas de sorção de lodo nas temperaturas de secagem, devido à incompatibilidade entre a alta atividade biológica da maioria das lamas e a necessidade de alcançar o equilíbrio térmico.

Ferrace *et al.*, (2002) explicaram que o efeito da temperatura na capacidade de evaporação tem uma grande influência sobre a cinética de secagem. Quando a temperatura da parede do secador é alta, a capacidade de evaporação na primeira fase de secagem é maior e a transição da fase pegajosa para a fase granular é mais rápida. Para o controle de um processo industrial de secagem deve-se ajustar a temperatura de acordo com o teor de umidade do produto para reduzir o tempo total de secagem.

Bennamoun (2012) realizou experimentos de secagem de lodos com energia solar identificando uma cinética de secagem das lamas com taxa constante, tendo um ou dois períodos de taxa de queda e um período final curto com variações ao longo do processo.

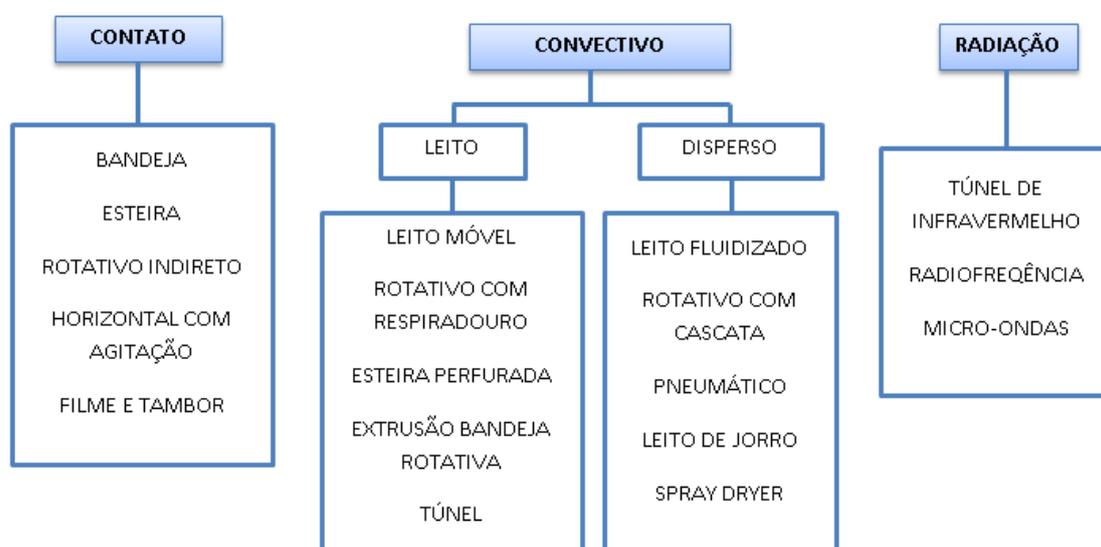
2.3.2 Tipos de secadores

Conforme Park *et al.*, (2007), para a secagem de líquidos, pastas e lodos, nas situações em que a separação sólido/líquido forem impossíveis ou muito complicada, é recomendado o uso de:

- a) secador do tipo *spray dryer*, pois o tempo de residência curto é uma vantagem para materiais sensíveis ao calor;
- b) secador em tambor, que pode ser combinado com vácuo para produtos sensíveis ao calor e
- c) secadores em bandejas rotativas ou à vácuo com agitação.

O processo de secagem de sólidos contempla o conhecimento da quantidade inicial e final de água do material; da relação da água com a partícula sólida e do transporte de água presente no interior do material para a superfície. As condições de secagem devem considerar as características de cada material, as propriedades do ar de secagem e os meios de transferência de calor utilizados. Alguns exemplos destes secadores são apresentados na Figura 3.

Figura 3. Classificação de secadores contínuos



Fonte: PARK *et al.*, (2007).

No mercado, existem diversos tipos de secadores térmicos: secadores rotativos diretos e indiretos, secadores de esteira diretos, secadores de caçamba diretos com misturadores internos, entre outros (LOBATO, 2011).

O secador de lareira múltipla tem menor capacidade de tratamento de lodos e tem uma limitação para reduzir o teor de umidade. O secador de disco rotativo necessita de um longo tempo para a secagem e dificuldade na manutenção devido a sua estrutura complexa (CHEN *et al.*, 2012).

Curi (2007), em testes de secagem de lodo com secador térmico rotativo a biogás, concluiu que para o processo ser economicamente viável, o lodo precisa ser previamente digerido e desidratado até concentração de sólidos na

ordem de 20-35 %, antes de ser tratado termicamente. O lodo atinge um aspecto granular, apresentando teor de sólidos de 90-95 %.

Chen *et al.*, (2012) afirmam que embora muitos tipos de secadores tenham sido propostos e desenvolvidos, cada um tem a sua problemática. O secador de pá, o secador de transporte e o secador de parafuso, por exemplo, não conseguem evitar a deposição de lamas pegajosas quando operados por um longo período.

Os secadores rotativos são os mais utilizados para a secagem direta. Quando comparados com secadores que utilizam esteira de transporte, verifica-se que os rotativos tem consumo médio de energia específica mais elevado. Em secadores descontínuos há menor consumo de energia, pois o lodo é parcialmente seco e a recuperação de energia é alta. Porém, o tempo de residência médio no secador é mais curto em secadores diretos que nos indiretos e as unidades de transformação têm capacidade maior (FERRACE *et al.*, 2009).

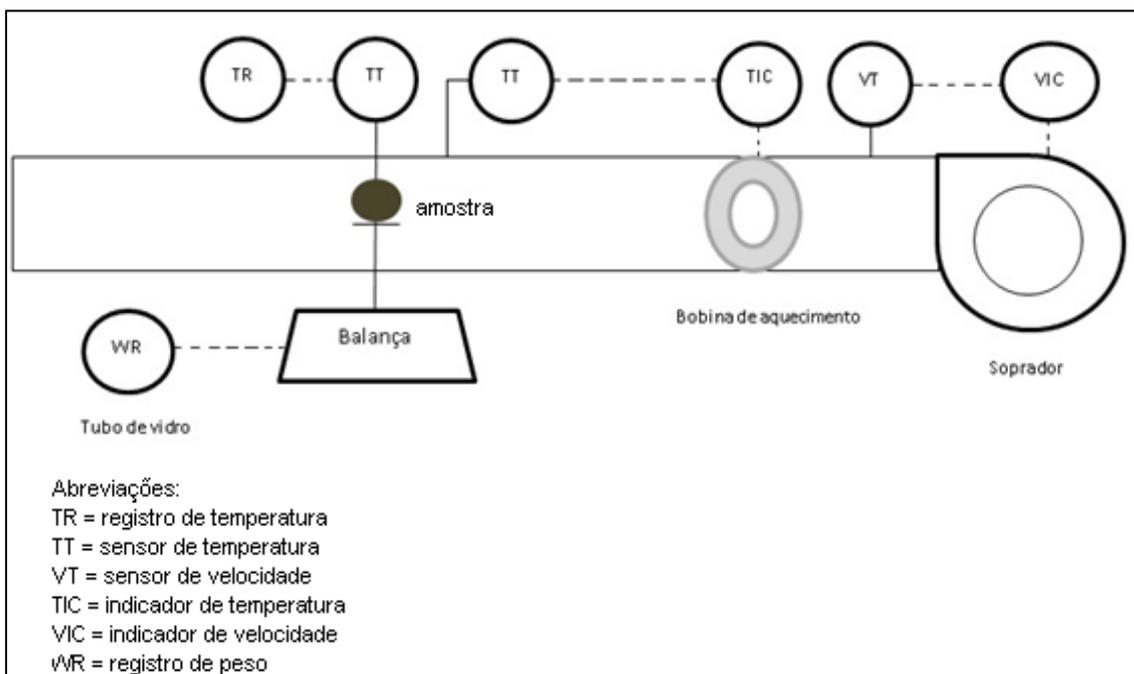
Ferrace *et al.*, (2009) demonstram que existem algumas vantagens dos secadores do tipo agitador: nenhuma poluição ou odor de confinamento, a concentração de calor transporta o vapor e há a redução dos riscos de incêndio e explosão com o nível de oxigênio baixo.

Li *et al.*, (2015) utilizaram técnica de imagem de tomografia para caracterizar o comportamento de secagem de lodos de depuração e misturas de serragem-lodo durante a secagem convectiva em um secador de leito fixo. Os resultados mostraram a adição de serragem tem um impacto positivo sobre o processo de secagem quando há uma porcentagem de 20 % de serragem adicionada à amostra.

Leonard *et al.*, (2008) estudaram a influência de uma operação de retro mistura sobre a correia de secagem por convecção de lodos industriais, sendo que a expansão do lodo fluidizado seco foi quantificada por meio da utilização de tomografia de raios-X, técnica utilizada para determinar a porosidade do leito e a área de troca total disponível para a transferência de calor e de massa. Para um mesmo fluxo de secagem, a expansão do leito de secagem conduziu a velocidades de secagem elevadas, permitindo uma redução do tempo total de secagem.

Font *et al.*, (2011) utilizaram um equipamento experimental (Figura 4) para a secagem de lodo de esgoto em que o ar sofre propulsão por uma ventoinha e é aquecido por resistências elétricas, fluindo paralelamente com a velocidade de 2 a 6 m/s. Os resultados apresentaram redução de volume de lodo, e formação de fissuras e camada de “pele”.

Figura 4. Esquema de aparato experimental



Fonte: FONT *et al.*, (2010).

Arlabosse *et al.*, (2005) realizaram melhorias no projeto de um secador de lodos de remo industrial. Os experimentos mostraram que a produção de massa seca foi significativa, sendo que 45 % do produto seco foi recirculado no secador. A vazão de alimentação foi de 267 kg de sólidos secos por hora e o teor de umidade de entrada do lodo foi de 1,5 kg de matéria úmida/kg de matéria seca. O tempo de permanência das lamas no secador foi estimada em cinco horas e meia.

Durante a secagem de sólidos as partículas têm uma significativa influência sobre as transferências de massa e de calor, as quais não dependem exclusivamente do fluxo de ar, mas também da orientação exata da amostra dentro do secador. Esses fatores combinados dificultam a definição de um modelo para a cinética de secagem (Font *et al.*, 2011).

2.3.3 A escolha do secador

Park *et al.* (2007) explicam que a maioria dos secadores pode lidar com particulados, mas só alguns podem lidar com pastas, lâminas e placas, sendo que para esse tipo de alimentação muitas opções de secadores podem ser eliminadas. Entretanto, a alteração do material antes da alimentação ou o pós-processamento devem ser considerados e podem aumentar o número de alternativas. Uma pasta viscosa, por exemplo, pode ser misturada com material seco, extrusada ou pré-formada.

Van't Land (1991) apresenta dois procedimentos para a seleção, um para processos em batelada e outro para processos contínuos. Para capacidades produtivas superiores a 100 kg/h, frequentemente, é usado secador contínuo. Características importantes sobre o sólido a ser seco determinará a escolha do secador. A partir de um questionário e fluxograma, conforme apresentado na Figura 5, o autor contempla fatores importantes do sólido a ser seco:

1. Informações gerais

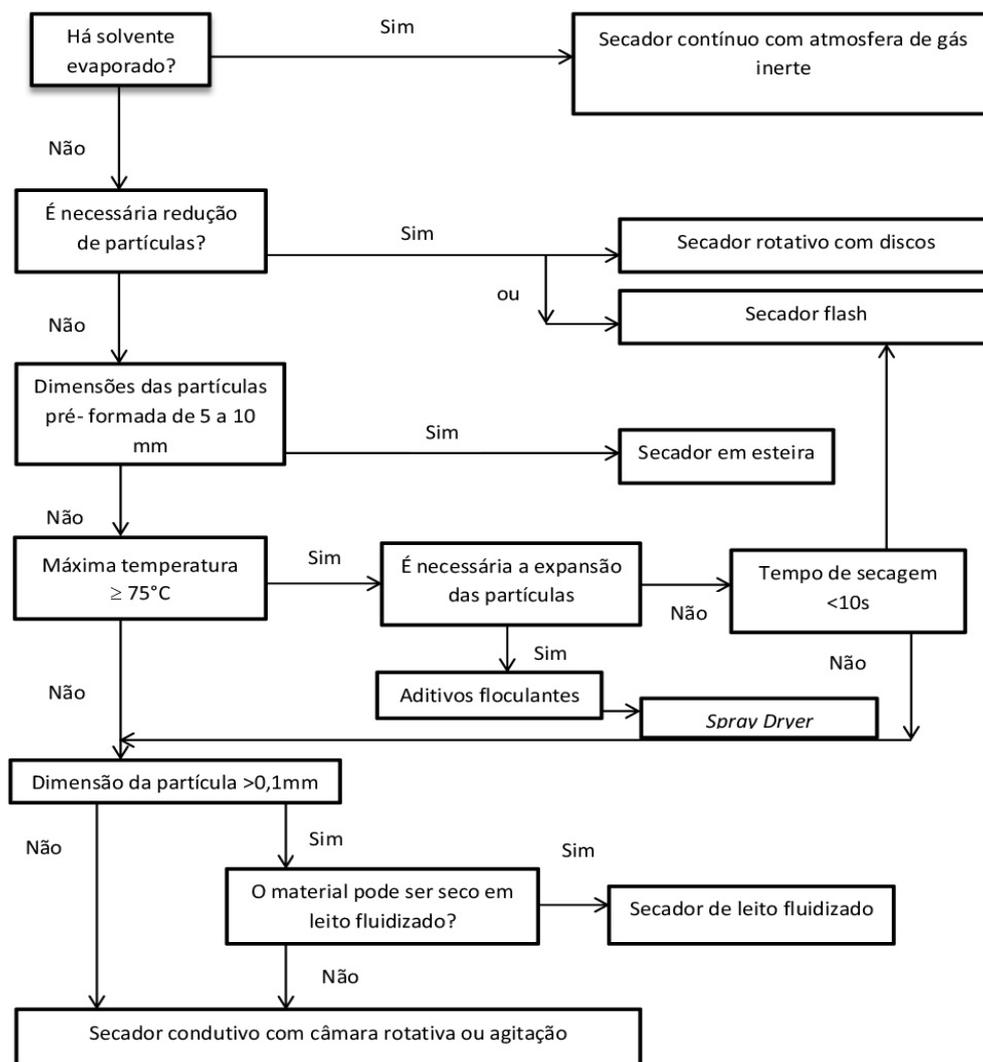
- a) Capacidade de produção (kg/h).
- b) Umidade inicial do material.
- c) Dimensão da partícula.
- d) Curva de secagem.
- e) Temperatura máxima suportada pelo produto.
- f) Informações sobre risco de explosão (vapor/ar e pó/ar).
- g) Propriedades toxicológicas.
- h) Experiência adquirida.
- i) Isotermas de sorção.
- j) Contaminação pelo gás da queima.
- k) Aspectos de corrosão.
- l) Dados físicos relevantes sobre os materiais.

2. Critérios sobre o produto seco.

- a) Conteúdo de umidade.
- b) Dimensões da partícula.
- c) Densidade aparente.

- d) Rigidez.
- e) Quantidade de pó.
- f) Características do fluxo.
- g) Cor.
- h) Odor.
- i) Sabor.
- j) Aparência.
- k) Dispersão.
- l) Adsorção.
- m) Tendência a aglomeração.
- n) Segregação do produto.

Figura 5. Fluxograma para a seleção de secadores contínuos



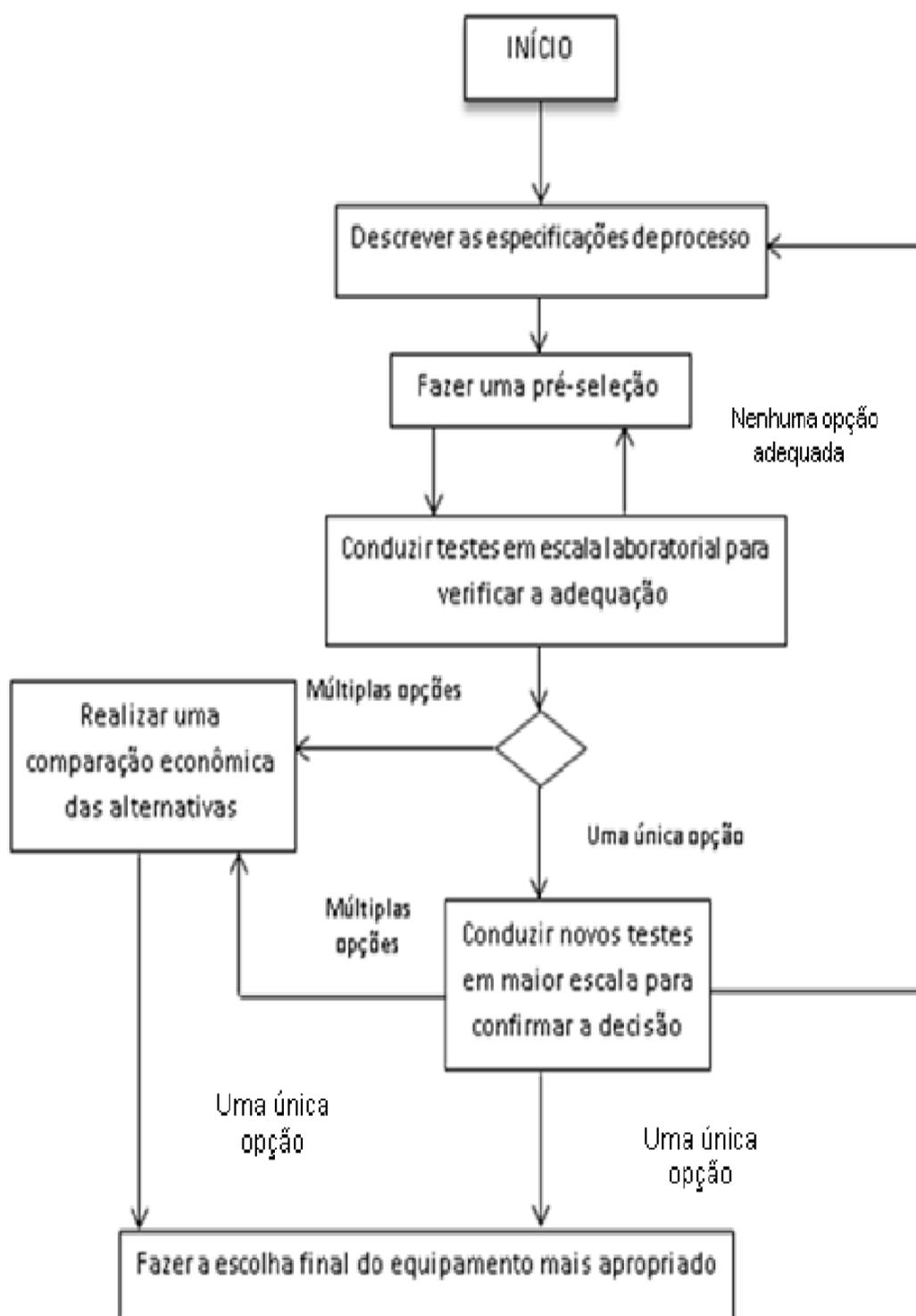
Fonte: Land (1991).

Com dados dos questionários aplicados aos fluxogramas em batelada ou contínuo, desenvolve-se a seleção do secador. Para complementar as informações o autor diz que para secar líquidos, pastas e lodosos utiliza-se secadores em tambor, assim como spray dryers. São recomendados isolamentos dos sólidos pelos métodos convencionais de cristalização caso a separação sólido/líquido seja impossível ou muito complicada. No entanto, pode ser combinado com vácuo para produtos sensíveis ao calor (VAN'T LAND,1991).

Secadores em batelada tendem a ser menores e são mais laboriosos, pois cada batelada tem que ser carregada e descarregada. Em geral, secadores em batelada dificilmente são adequados para produção acima de 1000 kg/h, enquanto os contínuos raramente são utilizados para produção abaixo de 50 kg/h (PARK *et al.*, 2007).

Baker e Labadibi (1998) definiram um procedimento para seleção de secadores em sistemas especialistas baseando-se em um conjunto de regras para efetuar a seleção de secadores, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6. Fluxograma de seleção de secadores pelo método de Baker e Labadibi



Fonte: Baker e Labadibi (1998).

2.4 USO DE CALOR RESIDUAL PARA A SECAGEM DE LODO TÊXTIL

Todas as fontes de energia são processos irreversíveis que têm um valor econômico. Mesmo considerando que esses recursos têm elevados custos de investimento, eles são continuamente utilizados. O processo de formação de custo é definido por conexões físicas com economia e termo economia. Esta definição é indicada, não só como teoria geral da economia de energia, mas também como pedra angular de conservação de energia. Conceitos como custo termodinâmico, finalidade, causalidade, recursos, sistemas, eficiência e estrutura e custo de processo de formação, constituem as bases fundamentais para a termo economia (UTLU & HEPBAŞLI, 2014).

2.4.1 Consumo energético da secagem de lodo têxtil com o uso de calor residual

O consumo de combustível, muitas vezes, é o principal componente operacional dos sistemas de secagem térmica, sendo que a utilização de fontes alternativas, como a recuperação energética do biogás, por exemplo, oriundo de processos anaeróbios, pode promover uma considerável redução nos custos operacionais (LOBATO, 2011).

Pulat *et al.*, (2007), em um estudo com águas quentes residuais de uma indústria têxtil, verificaram que o período de retorno do investimento é de apenas 6 meses. Os resultados da análise termoeconômica mostraram que a taxa de destruição de exergia e aumento do lucro econômico aumentam com a vazão mássica da água residual. Similarmente, a taxa de destruição de exergia, eficácia, lucro econômico e eficiência aumentam à medida que a temperatura de entrada de águas residuais é elevada.

Tarelho (2010) concluiu que o processo deixa de ser autotérmico a 800 °C para um teor de umidade da mistura de 60%, o que corresponde à fração de 0,785 de lodos na mistura. Além disso, verificou também que a vazão de lamas que se poderia secar era igual 0,843 kg/h, o que representa 49,5% da massa de lamas da mistura combustível alimentada na câmara de combustão.

O excesso de calor industrial é um grande recurso inexplorado do qual existe um potencial para uso externo que criaria benefícios para a indústria e sociedade. O uso do excesso de calor pode fornecer uma maneira de reduzir o

uso de energia primária e de contribuir para a mitigação global de CO₂ (VIKLUND AND JOHANSSON, 2014).

Oluleye *et al.* (2016) afirmam que com resultado do esgotamento das reservas de combustíveis fósseis, fontes de energia convencionais são cada vez menos disponíveis, porém a energia continua a ser desperdiçada, especialmente sob a forma de calor. A eficiência energética do processo, produção de energia útil por unidade de energia de entrada, pode ser aumentada através da utilização de calor residual, resultando em economia de energia primária.

O funcionamento de um processo industrial requer a inclusão de utilidades, inserindo-se neste grupo as utilidades quentes ou frias, que visam satisfazer as necessidades entálpicas do processo. As correntes processuais podem requerer aquecimento ou resfriamento, pelo que se impõe uma troca entálpica. Quando se recorre, exclusivamente, a utilidades externas ao processo, o consumo de energia é maximizado (NOWICKI e GOSSELIN, 2012).

O mecanismo para recuperar calor não utilizado depende da temperatura do gás residual aquecido e a economia envolvida. A energia perdida nos gases residuais não pode ser totalmente recuperada. No entanto, grande parte desse calor poderia ser recuperado se fossem adotadas medidas que minimizassem perdas (UNEP, 2006).

Dependendo do tipo de processo, o calor residual pode ser descartado em praticamente qualquer temperatura, desde a água de resfriamento até as altas temperaturas dos gases residuais de um forno ou caldeira industrial. Normalmente, as temperaturas mais elevadas resultam em maior qualidade de recuperação de calor e maior eficácia de custo. Em qualquer estudo de recuperação de calor, é absolutamente necessário que haja algum uso para o calor recuperado. Exemplos típicos de utilização seriam o pré-aquecimento do ar de combustão, o aquecimento de espaços ou o pré-aquecimento da água de alimentação de caldeira ou água de processo (ARZBAECHER *et al.*, 2007).

Há três parâmetros importantes utilizados na quantificação do calor residual: quantidade, qualidade e disponibilidade temporal. A quantidade de calor residual disponível pode ser expressa em termos de fluxo de entalpia da corrente residual, conforme ilustrado na Equação 01:

$$H = \dot{m} \cdot h \quad (1)$$

onde

H = fluxo de entalpia total da corrente residual (kJ/h)

\dot{m} = vazão mássica da corrente residual (kg/h)

h = entalpia específica da corrente residual (kJ/kg)

A qualidade pode ser mais ou menos expressa em termos da temperatura da corrente residual. Quanto mais elevada for a temperatura, mais disponível será o calor residual para substituição de energia comprada.

O potencial econômico de sistemas de recuperação de calor residual depende da recuperação de capital, o que por sua vez, depende da economia anual de combustível. Esta economia pode ser difícil de prever, porque depende da distribuição temporal de resíduos e da disponibilidade de carga térmica (NOWICKI e GOSSELIN, 2012).

Além disso, a taxa de recuperação de capital com equipamentos de recuperação de calor difere, substancialmente, do equipamento relacionado com a produção, uma vez que é normalmente fixado por taxas de serviços públicos e os valores atuais do mercado de combustíveis e não pode ser tão facilmente ajustada através da manipulação dos preços de venda do produto (KEMP, 2007).

Ye *et al.*, (2015) afirmam que os processos de secagem convencionais fornecem descarga de gás com alta umidade para a atmosfera e que os gases de escape contêm grande quantidade de energia, que é altamente desperdiçada. A fim de melhorar a eficiência térmica do processo de secagem em seu trabalho, um novo sistema de bomba de calor aberto a absorção foi proposto, visando recuperar o calor latente de gás úmido exausto e produção de vapor para reutilização. Os resultados da eficiência de recuperação de calor variaram de 15,1 % para 54,8 % quando a temperatura de calor da fonte variou de 135 °C a 175 °C e foi produzido vapor saturado de 100 °C.

2.4.2 Custos na recuperação de calor residual

Brückner *et al.* (2015) investigaram o potencial do calor residual industrial para aplicações de aquecimento e refrigeração contemplando diferentes processos industriais e as suas temperaturas de operação como possível fontes de calor de resíduos. Apresentando tecnologias de transformação de

calor e discutindo sobre o seu potencial técnico e econômico foram contemplados o uso de calor residual por equipamento chiller e bomba de calor de absorção. O máximo custo de investimento aceitável para cada tecnologia é estimado e comparado com o custo de investimento em função das horas de funcionamento do sistema, sendo o fator anuidade o mais importante.

Miah *et al.* (2015), em um estudo de recuperação de calor residual, consideraram o papel de bombas de calor para melhorar significativamente a eficiência energética de processos industriais. Estabeleceu um procedimento de decisão para escolha de processo ou a integração de calor utilitário em fábricas complexas e diversas. Além disso, foi adotado um sistema de classificações fluxos adicionais para identificar fluxos separados que podem ser praticamente integrados. A aplicação do fluxo em uma fábrica de doces modificada produziu quatro opções capazes de levar a uma redução total de energia de cerca de 32%, com um período de retorno econômico de cerca de 5 anos.

A análise exergoeconômica tem sido amplamente utilizada para a avaliação de desempenho de sistemas térmicos. Neste caso, combustível e produto de um componente são definidos, contemplando registo sistemático de toda a adição e remoção de exergia do sistema (UTLU e ARIF HEPBAS, 2015).

A análise pela segunda lei da termodinâmica (exergia) trata da degradação da energia, a geração de entropia e, conseqüentemente, as perdas de oportunidade da realização de trabalho, identificando os pontos críticos que requerem os esforços principais no sentido de melhorar o desempenho do sistema. A análise de exergia estima a perda ocasionada pelas irreversibilidades, sendo uma importante propriedade termodinâmica, pois indica o trabalho útil que pode ser produzido por uma substância ou a quantidade de trabalho necessária para concluir um determinado processo, apresentando informações a respeito da ocorrência de ineficiências do sistema. Os custos de secagem dependem de uma série de fatores, dentre os quais se podem citar:

- o tipo de produto e a finalidade a que se destina;
- os teores de umidade inicial e final do produto;
- as características do sistema de secagem utilizado e
- a capacidade efetiva de secagem do sistema.

3. METODOLOGIA

3.1 COLETA DE DADOS

A empresa do ramo têxtil que forneceu o lodo para este estudo está situada em Jaraguá do Sul; possui cerca de 900 funcionários; consome cerca de 130.000 m³/mês de água; gera 150 toneladas de lodo/mês; descarta, diariamente, 5.000 m³ de lodo e produz, em média, 1.000 toneladas/mês de malhas.

A indústria compreende as etapas de preparação, fiação, tecelagem, tingimento, estamparia e acabamento. Além de outros resíduos gerados na empresa, há a geração de efluentes industriais e sanitários. Tais efluentes, após passarem por tratamento na ETE, se subdividem em efluente tratado e lodo, sendo que este passa por uma centrífuga e, posteriormente, é destinado ao aterro industrial em Joinville.

3.2 CARACTERÍSTICAS DO LODO INDUSTRIAL TÊXTEL

O lodo em estudo é proveniente de uma ETE industrial e sanitária, obtido por processo de deságue em uma centrífuga da marca Westfalia, modelo CA 450-0010.

O teor de umidade percentual em base seca (U%) do lodo centrifugado na própria empresa foi obtido tanto por dados fornecidos pela empresa parceira, fornecedora do lodo, como em teste realizado no laboratório de materiais da Univille. A empresa utilizou procedimento interno no qual massa úmida conhecida do lodo foi seca em estufa de secagem a 120 °C durante 72 h. Após resfriamento até temperatura ambiente em dessecador, a massa seca de lodo foi determinada. Este mesmo procedimento foi realizado em laboratório da Univille. O teor de umidade foi calculado de acordo com a Equação 02.

$$u (\%) = \frac{mu - ms}{ms} \cdot 100 \quad (02)$$

Onde

u = teor de umidade (%)

mu = massa da amostra em seu estado original, antes da secagem (g)

ms = massa da amostra após a secagem (g)

De modo a confirmar o teor de umidade da amostra de lodo foi realizada uma análise termogravimétrica (TGA). As análises de TGA foram realizadas em 3 amostras do mesmo lodo têxtil coletado na empresa parceira, as quais se denominou: lodo têxtil 1, lodo têxtil 2 e lodo têxtil 3. A degradação térmica e a variação da massa em função da temperatura, em uma atmosfera controlada das amostras injetadas em PELBD, foram investigadas por TGA. Em um porta-amostra de platina cerca de 0,5 mg de cada amostra foi inserida e aquecida, de 10 a 300 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹ em atmosfera de nitrogênio. As curvas termogravimétricas foram geradas pelo software TA Instruments. Logo após, compararam-se os dados fornecidos pela empresa e os dados obtidos em laboratório, a fim de confirmar o teor de umidade para o presente estudo.

Foram disponibilizados pela empresa, dados referentes às características do lodo final gerado na estação de tratamento de efluentes (ETE) a partir de laudo de análise em laboratório (Anexo 1), além de:

- quantidade mensal gerada;
- custos com transporte do lodo e
- custos com sua destinação em aterro;

Estes dados foram aplicados para estimar os custos mensais com a destinação deste resíduo.

3.3 CARACTERÍSTICAS DA CORRENTE DE EXAUSTÃO DO AQUECEDOR DE FLUIDO TÉRMICO EM ESTUDO

Foi fornecido pela empresa um relatório de amostragem dos gases provenientes da chaminé do aquecedor de fluido térmico, fonte do calor residual em questão (Anexo 2). Os dados presentes neste relatório foram utilizados para obter os dados isocinéticos desta corrente, os quais objetivam a secagem do lodo em questão neste trabalho.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO LODO TÊXTIL DURANTE SECAGEM

O aspecto das duas amostras de lodo, antes dos experimentos de secagem em duplicata pode ser visualizado na Figura 7, sendo que o béquer à esquerda, corresponde ao lodo do 1º ensaio e o da direita, ao do 2º ensaio.

Figura 7. Aspecto visual das amostras de lodo antes da secagem. Primeiro ensaio (à esquerda) e segundo ensaio (à direita).



Fonte: Primária (2016).

Os dados iniciais das amostras de lodo, obtidos antes da secagem em secador de leito fixo estão apresentados na Tabela 1.

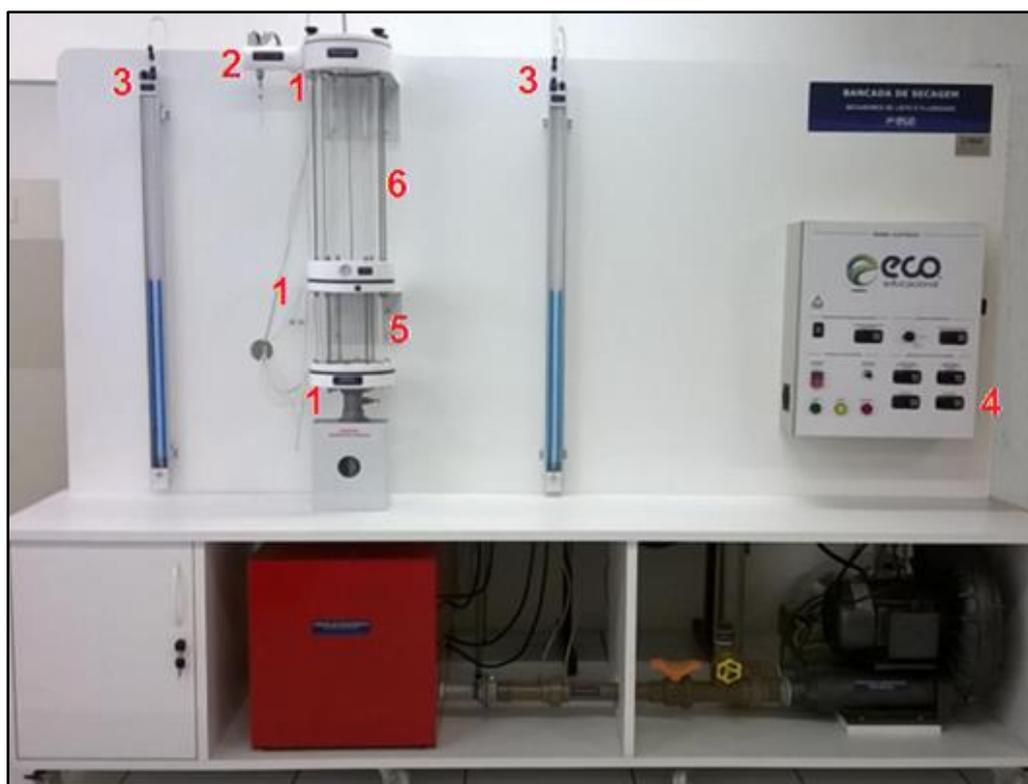
Tabela 1. Dados das amostras de lodo têxtil antes da secagem

Experimento	Massa Inicial (g)	Temperatura do ar (°C)	Umidade Relativa (%)
1	2700	21	85
2	2690	21,9	58

Os testes de secagem foram realizados somente em regime de leito fixo devido à característica pegajosa das amostras do lodo em estudo, a qual não permitiu a fluidização do material.

O equipamento utilizado foi um secador de leito fixo, fabricado pela empresa Eco educacional (Figura 8).

Figura 8. Bancada de secagem em leito fixo e seus principais componentes.



Fonte: Primária (2016).

LEGENDA:

1. Sensores de temperatura na entrada da câmara, ar de secagem e dentro do leito de secagem (espeto). 2. Psicrômetro de bulbo seco e úmido. 3. Manômetros. 4. Painel de comandos e indicações de temperatura. 5. Câmara de aquecimento. 6. Câmara (leito) de secagem.

A câmara de secagem (6) possui diâmetro interno de 150 mm e altura de 600 mm e a câmara de aquecimento, utilizada para equalização de fluxo, possui diâmetro interno de 150 mm e altura de 200 mm. Já a placa de orifício, usada para determinação da velocidade do ar de secagem, tem um diâmetro de 20 mm (Anexo 4)

As massas úmidas de lodo, empregadas para o teste de secagem em duplicata, foram de 2700 g e 2690 g. A quantidade de amostra foi determinada em função da capacidade do secador de leito fixo utilizado. O tempo de secagem foi determinado quando a umidade do material na entrada do secador, praticamente, se igualou à umidade de saída.

A temperatura do ar de secagem foi estabelecida em 90 °C, devido a limitações do equipamento.

Previamente ao início de cada corrida foram registrados os valores de umidade relativa do ar e temperatura ambiente por meio de um termo-higrômetro digital da marca Minipa.

Durante a operação de secagem, em intervalos de 10 minutos, foram anotados os valores das temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido do ar pelo psicrômetro, conforme indicações do painel. O teste foi considerado finalizado quando a temperatura de saída da câmara de secagem se igualou à de sua entrada. Após o término dessa operação, a massa final de cada amostra foi pesada.

Com o uso de uma carta psicrométrica Carrier para altas temperaturas (anexo 3) e o *software* de carta psicrométrica *on line* (CARTA PSICOMÉTRICA, 2017, web), foram obtidos os valores da umidade absoluta do ar em kg de vapor/kg de ar seco, durante o período de duração de cada corrida. A partir destes dados, foi realizado balanço de massa para estimar a quantidade de água perdida durante a secagem e construir a curva de velocidade de secagem, contendo os valores de umidade absoluta (kg H₂O/kg ar seco) em função do tempo de secagem do material.

A fim de corroborar com a experiência realizada, comparou-se esses resultados com os fornecidos pela empresa Albrecht de Joinville/SC, especializada na fabricação de secadores que visam o aproveitamento de calor residual para a secagem de lodos. Os testes foram realizados conforme Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 8112, da seguinte maneira:

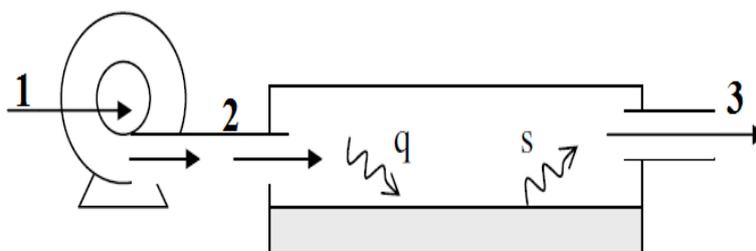
- 10 g da amostra homogeneizada em uma cápsula de evaporação previamente seca e pesada e colocada em estufa com circulação de ar na temperatura de 110 ° C;
- A amostra foi pesada em intervalos de 15 min até a obtenção de massa constante;
- O teor de umidade em porcentagem foi calculado por meio da Equação 02 ao final da secagem.

3.5 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CALOR NECESSÁRIA PARA A SECAGEM DO LODO PRODUZIDO NA EMPRESA

Em um processo de secagem típico, o ar ambiente (1) é aquecido (2) em um jogo de resistências (ou outro aquecedor) e, em seguida, é insuflado sobre o leito de secagem. O calor adicionado ao ar (q) é transferido ao material a ser

seco. A umidade presente no material é aquecida e transformada em vapor (s) para, finalmente, se difundir no ar e sair da câmara de secagem transportada pelo ar, agora resfriado e mais úmido (3). Esse processo está representado na Figura 9.

Figura 9. Diagrama de operação de um processo de secagem térmica.



Fonte: Adaptado de Park *et al.*, (2016).

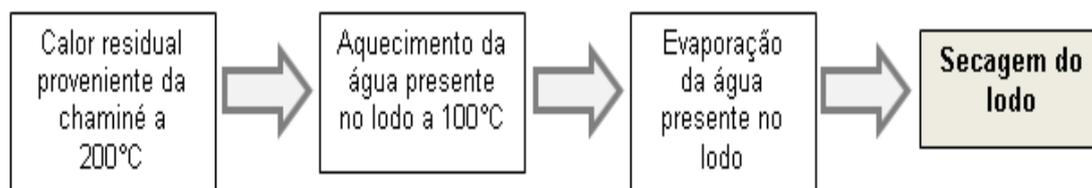
A taxa de ar úmido (\dot{m}) que entra no secador corresponde à vazão volumétrica (Q) multiplicada pela densidade do ar (ρ) aquecido, conforme mostrado na Equação 03.

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \quad (03)$$

3.5.1 Cálculos da quantidade necessária de energia para a secagem pelo aproveitamento do calor da chaminé

Considerou-se o seguinte processo de aproveitamento energético de calor residual da empresa para a secagem de lodo têxtil, conforme representado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma representando a secagem por meio de calor residual



Fonte: Primária (2017).

Para o cálculo da quantidade de calor necessária, considerou-se alguns fatores:

- Necessidade de secagem de 5 toneladas por dia (150 t/mês), quantidade gerada pela empresa, com regime de funcionamento de 8 e 24 h por dia do secador.
- Taxa de umidade inicial do lodo em 80%, teor de umidade do lodo gerado pela empresa e
- Taxa de umidade final de 10%, umidade final desejada.

Além disso, consideraram-se dois diferentes cenários:

- Cenário 1 - Regime de funcionamento do secador de 8 h por dia, equivalente a secagem de 625 kg/h de lodo úmido.
- Cenário 2 - Regime de funcionamento de 24 h por dia equivalente a secagem de 208 kg/h de lodo úmido.

Admite-se que a troca de calor entre o gás e o lodo é composto tanto pelo calor sensível como pelo calor latente em função da água presente no lodo. Portanto, em relação a quantidade de calor necessário para a secagem, considera-se as seguintes fases:

- 1ª fase – Aquecer a água a 100 °C.
- 2ª fase – Evaporação da água.

As Equações 04, 05, 06, 07 e 08 foram utilizadas para se determinar os valores de taxa de secagem.

1ª fase

$$q_1 = \dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot \Delta T_1 \quad (04)$$

onde

q_1 = quantidade de calor necessária para o aquecimento do lodo (kcal/h)

\dot{m}_1 = vazão mássica do ar na saída do sistema a 80% de teor de umidade (kg/h)

c_{p1} = calor específico do gás na corrente de exaustão (cal/g°C)

ΔT_1 = diferença entre a temperatura inicial e final do lodo (°C)

2ª fase

$$Q_2 = m \cdot L \quad (05)$$

Onde

Q_2 = calor latente (quantidade de calor que um corpo precisa receber ou ceder para mudar de estado físico)

m = quantidade de água a ser evaporada

L = calor latente da substância a ser evaporada

Segundo Rosa *et al.* (2016), o calor específico do lodo é igual a 0,385 kcal/kg°C. Para cálculo do aquecimento da massa úmida de lodo, que precisa ser aquecido de 20 °C (temperatura ambiente) para 100 °C (temperatura de secagem), tem-se a Equação 06:

$$q_3 = \dot{m}_3 \cdot c_{p3} \cdot \Delta t_3 \quad (06)$$

onde

q_3 = quantidade de calor necessária para o aquecimento

c_{p3} = calor específico do lodo

\dot{m}_3 = massa de lodo a ser aquecida

Δt_3 = diferença entre temperatura inicial e final do lodo

Considerando-se que não houve isolamento térmico dos modelos de secadores propostos neste trabalho, para o cálculo de energia perdida para o ambiente (dissipação) tem-se a Equação 07:

$$q_4 = A \cdot h \cdot \Delta t_4 \quad (07)$$

onde

q_4 = quantidade de energia perdida para o ambiente

A = área do tambor do secador

h = coeficiente de convecção médio do ar, conforme dado fornecido pelo fabricante do equipamento

Δt = diferença média de temperatura entre a superfície externa do secador e a temperatura do ar na vizinhança, conforme dado fornecido pelo fabricante do equipamento.

Finalmente, para se obter os valores de taxa de secagem do lodo, efetua-se a soma dos valores de calor encontrados anteriormente. Tal valor resulta em q_t , energia necessária para a secagem do lodo, conforme Equação 08.

$$q_t = q_2, Q_2, q_3 \text{ e } q_4 \quad (08)$$

3.6 CÁLCULO DA QUANTIDADE DE CALOR DISPONÍVEL NO AQUECEDOR DE FLUIDO TÉRMICO

Em qualquer situação de recuperação de calor, é essencial saber a quantidade recuperável, bem como sua utilização.

Tanto no caso do modelo de secagem apresentado quanto em quaisquer outros tipos de gases quentes, o calor que poderia, potencialmente, ser recuperado pode ser calculado a partir da Equação 09.

$$q_5 = \dot{m}_5 \cdot c_{p5} \cdot \Delta T_5 \quad (09)$$

onde

q_5 = conteúdo de calor na mistura gasosa (kcal)

\dot{m}_5 = vazão mássica do ar (kg/h) na saída do sistema considerando o volume e temperatura do ar na chaminé apresentados no laudo da empresa (ver Anexo 2)

c_{p5} = calor específico do gás na corrente de exaustão (kcal/kg.°C)

ΔT_5 = diferença entre a temperatura do gás de saída da chaminé e a temperatura final desse mesmo gás, após transferência de calor pretendido (°C)

Comparando-se a quantidade disponível encontrada (q_5) e a quantidade necessária para a secagem (q_i), verificou-se a possibilidade de aproveitamento do calor residual na empresa estudada.

3.7 ESCOLHA DO SECADOR

Para a escolha do secador respondeu-se ao questionário proposto por Van't Land (1991) a fim de contemplar fatores importantes do sólido a ser seco. Posteriormente seguiu-se com o fluxograma (Figura 06) indicado pelo autor.

A partir dos testes realizados, buscou-se junto a um fabricante de secadores, equipamentos que pudessem suprir a necessidade exposta.

3.8 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA AS SITUAÇÕES PROPOSTAS

O custo do processo de secagem poderá ser avaliado com base no consumo energético do ventilador (por exemplo), que deverá ser capaz de atender a demanda apresentada no parágrafo anterior.

Assim, o consumo energético do processo dependerá, fundamentalmente, de dois fatores:

- Energia consumida nos ventiladores e
- Energia consumida no aquecimento do ar.

O calor deve ser aplicado ao secador para obter-se:

- Aquecimento da alimentação (sólido seco mais água) da temperatura ambiente até a temperatura de vaporização;
- Vaporizar a água do sólido seco;
- Aquecer o sólido seco da temperatura de vaporização até a sua temperatura final, quando sai do secador ou quando acaba a secagem;
- Aquecer o vapor de água da temperatura de vaporização até a sua temperatura final, quando sai do secador ou quando acaba a secagem;

Os cálculos de custos e análise da viabilidade econômica para aproveitamento do calor residual basearam-se nos dados de produção de lodo e, conseqüentemente, custos com a destinação deste material.

Para determinar os custos envolvidos com a destinação do lodo considerou-se o valor mensal gasto pela empresa, a qual inclui frete e destinação do resíduo ao aterro industrial de Joinville/SC.

A partir dos cálculos de custos dos processos de secagem com aproveitamento de calor residual para as duas situações propostas e os valores atuais com a destinação do lodo, efetuou-se a análise de viabilidade através de planilhas do programa Excell[®]. Posteriormente, identificou-se o tempo de retorno do investimento.

Para a análise de viabilidade da implantação do secador, foram contemplados, além dos custos de aquisição e instalação do secador, os valores resultantes das diferenças entre os custos com o lodo úmido e aqueles

provenientes de sua secagem, além dos custos com a destinação final do material. O retorno do investimento foi calculado utilizando-se valores de retorno simples.

O tempo de retorno do investimento foi obtido pela equação (11), Dal Farra (2004).

$$\text{Tempo de retorno simples} = \sum_{t=0}^n FDL \ t = 0 \quad (11)$$

Onde:

FDL = fluxo de caixa líquido diferencial no período

n = número de períodos

t = períodos

3.9 BALANÇO DE MASSA

O balanço de massa foi realizado para o cenário considerado de maior viabilidade econômica, contemplando dados do secador, regime de funcionamento e dados da corrente de exaustão do aquecedor de fluido térmico.

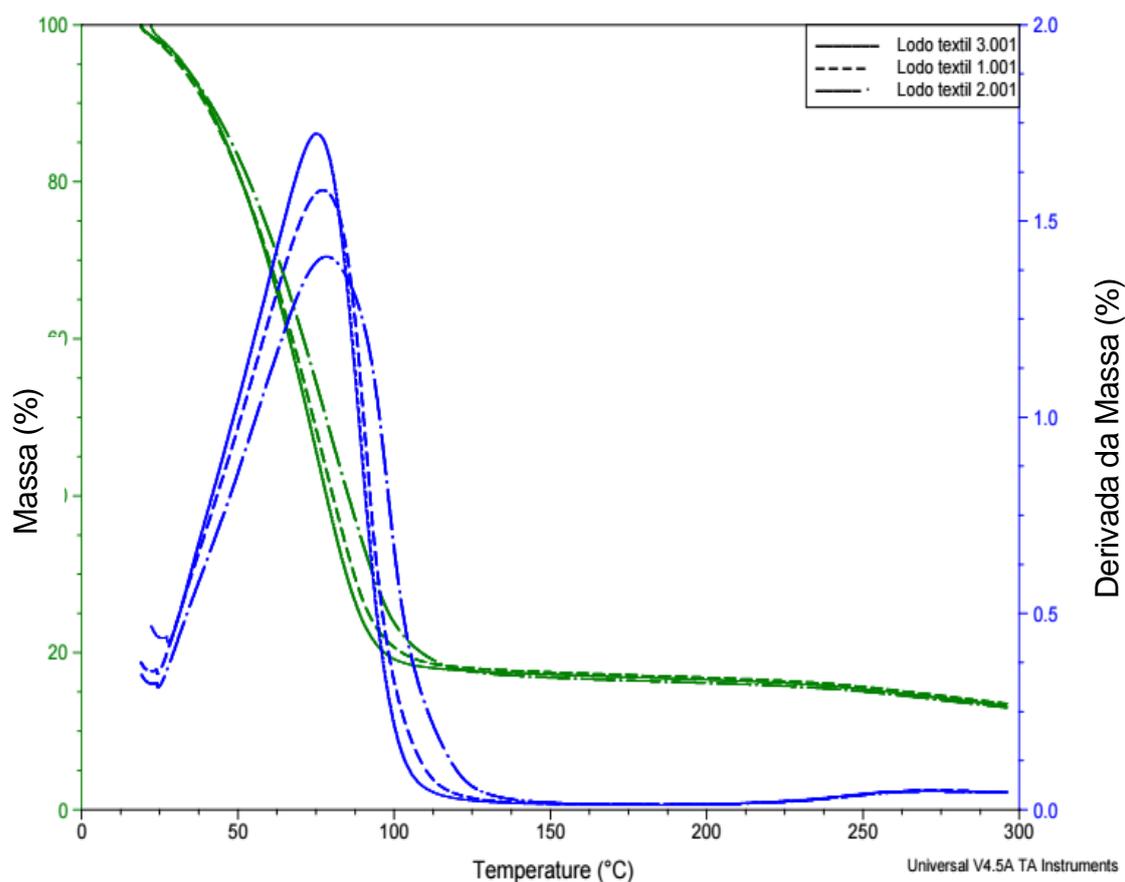
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERÍSTICAS DO LODO INDUSTRIAL TÊXTIL

A empresa informou que o lodo de sua ETE tem teor de umidade de 80 a 85%.

A Figura 11 apresenta as curvas termogravimétricas das três amostras de lodo obtidas pela análise termogravimétrica (TGA). Nas curvas termogravimétricas (curvas TG) em verde, observa-se o comportamento do lodo no que diz respeito à perda de massa em função da temperatura, enquanto as curvas em azul são as primeiras derivadas das curvas termogravimétricas (curvas DTG).

Figura 11 - Curvas termogravimétricas e derivadas das três amostras de lodo. Curvas TG (em verde) referente à perda de massa em função da umidade e curvas DTG (em azul) referentes ao pico endotérmico.



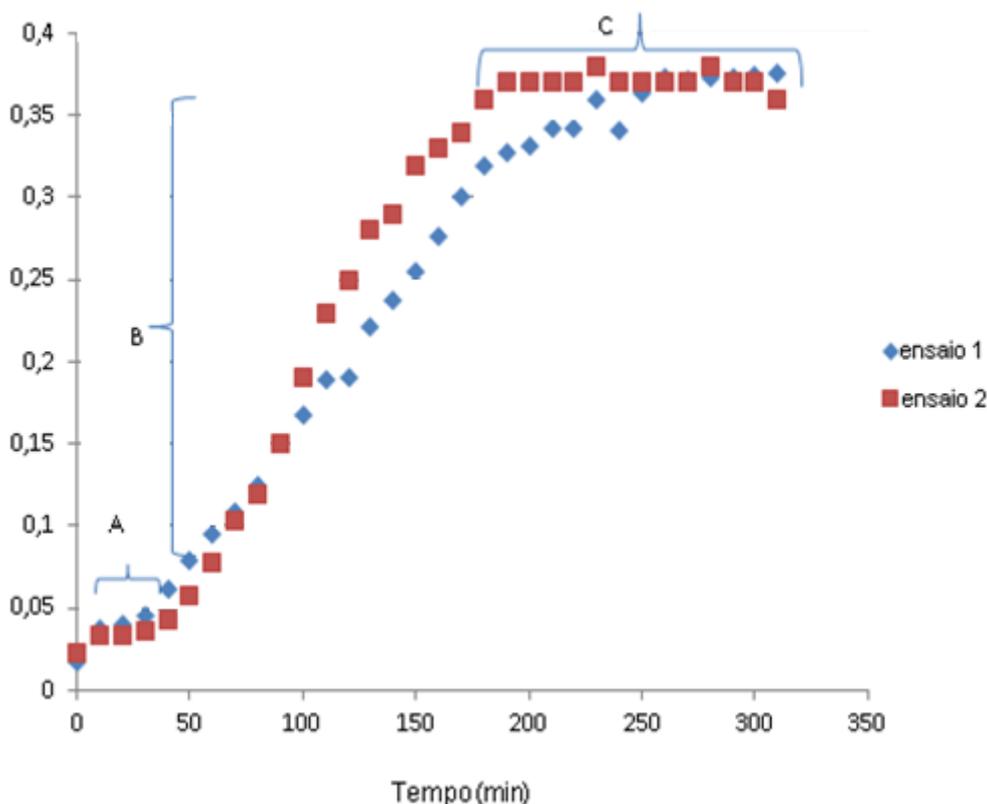
Fonte: Primária (2017).

As curvas TG das amostras de lodo, denominadas 1, 2 e 3 apresentaram maior estágio de perda de massa em: 76,94°C, 78,16°C e com 75,14 °C, respectivamente. O percentual de água total presente nas amostras corresponde a: 81,77%, 82,19% e 81,51%, respectivamente. Estes valores se apresentam similares ao teor de umidade fornecido pela empresa, que varia de 80 a 85%. Desta forma, é adequada a utilização de um valor de umidade igual a 80% para o desenvolvimento do presente trabalho.

4.2 RESULTADOS DOS TESTES DE SECAGEM EM LEITO FIXO

Considerando-se a presença dos termômetros de bulbo seco e úmido do secador de leito fixo localizados na saída do equipamento (psicrômetro), pela Figura 12 é possível observar as fases de secagem do sólido.

Figura 12. Curva de velocidade de secagem para os ensaios 1 e 2, representadas em kg vapor/kg ar seco na saída do secador em função do tempo em minutos.



Fonte: Primária (2017)

Primeiramente, há um curto período em que a amostra de lodo está sendo aquecida e a curva de secagem apresenta velocidade lenta, denominada fase A. Font *et al.*, (2011) observaram as etapas na secagem de um sólido sob um fluxo de ar quente citando que, inicialmente, existe um curto período em que a amostra é aquecida ou arrefecida, quando a variação de temperatura depende da transferência de calor do ar para o sólido e da evaporação, o que provoca um resfriamento dos sólidos.

Posteriormente, quando a amostra já se apresenta aquecida, é possível constatar uma fase em que a velocidade de secagem é crescente em função do tempo. Denominou-se esta fase de fase B. Este comportamento pode ser explicado pelo fato da presença de grande parte de água contida no lodo poder ser facilmente removida com o aquecimento do sólido.

Por fim, observa-se que houve um período em que a velocidade de secagem permaneceu constante. Chamou-se esta de fase C. Durante este período é possível observar o efeito de “pele”. A formação de pele dificulta a formação de fissuras no material, criando dificuldades na passagem de ar e na evaporação de água ainda presente dentro do lodo. Observou-se também durante a secagem a formação de fissuras ao redor de partes do lodo. Font *et al.*, (2010) também apontaram tais características durante a secagem do lodo e confirmaram que a formação de fissuras aumenta as taxas de secagem, enquanto a camada de pele (casca) promove a redução destas taxas.

A secagem foi cessada quando atingido aproximadamente 5% de teor de umidade. O lodo seco tem aspecto granular, apresentando teor de sólidos de 90-95%, características também indicadas por Curi (2007). Dados iniciais e resultados obtidos após a secagem são obtidos pela Equação (02) (Tabela 2).

Tabela 2. Dados do lodo têxtil coletados antes e após a secagem

Amostra	Massa inicial (kg)	Massa final (kg)	Umidade (%)
1	2700	0,568	5%
2	2690	0,557	3,5%

Fonte: Primária (2016)

A redução do volume das amostras foi significativa durante a secagem, conforme pode ser observado na Figura 13. Ao aplicar secagem condutora e considerando as variações de torque, o produto passa pelas fases pastosa, aglomerada e granular. Uma atenção especial é dada à fase pegajosa, pois esta apresenta redução no desempenho dos secadores.

Figura 13. Redução de volume das amostras ao longo da secagem



Fonte: Primária (2017)

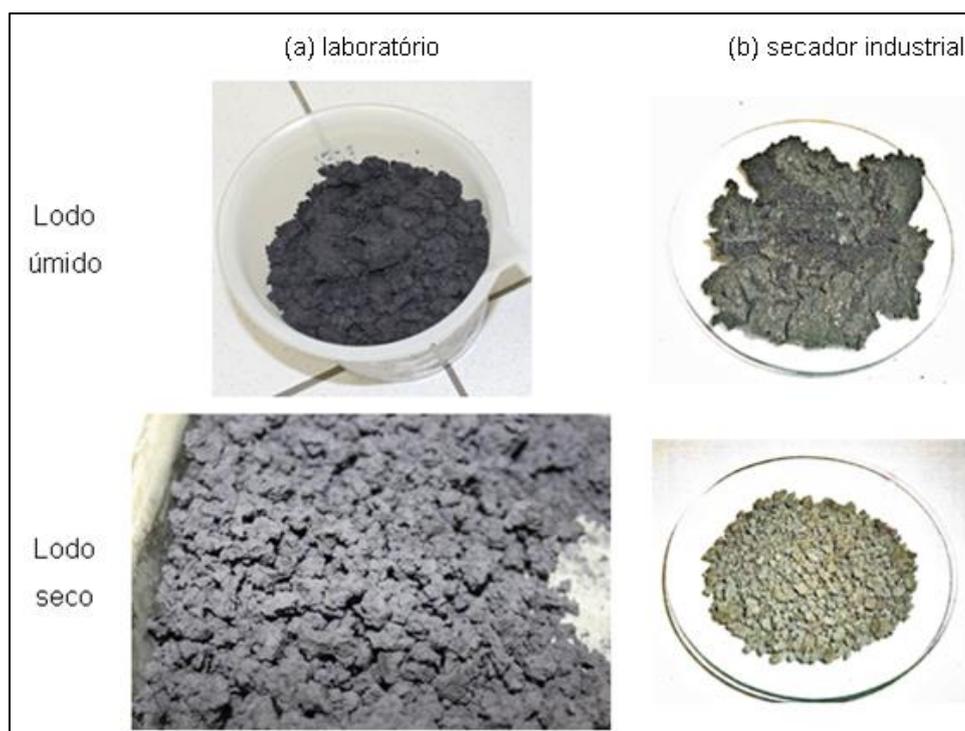
Outro fato observado durante os testes de secagem é a formação de pelotas de lodo, a qual ocorreu após uma hora de ensaio, conforme apresentado na Figura 15. Ferrace *et al.* (2002) denominaram esta fase da secagem do lodo como fase de "cola", e confirmou que altos níveis de tensão mecânica são observados e, em seguida, a massa compacta começa a se quebrar. Arlabosse *et al.* (2005) comprovaram que, na entrada do secador, a lama tem uma consistência pastosa e que à medida que o teor de umidade diminui, o lodo torna-se pegajoso e se quebra em pelotas. Deng *et al.* (2009) dizem que o lodo apresenta as fases pastosa, grumosa e granular durante o processo de secagem, sendo que a fase pastosa é uma fase de partículas saturadas, e a fase granular é considerada como uma fase particulada mono-dispersa.

Durante o experimento se observou que a falta de movimento das partículas do sólido, aliado à pequena superfície de secagem do material, considerando a forte ligação das partículas, reduz a possibilidade de secagem pela dificuldade de entrada da corrente de ar quente. Ferrace *et al.* (2002) sugerem que para encurtar o processo de secagem, é necessário ajustar a temperatura da parede do secador de acordo com o teor de umidade dos lodos.

Efetuada-se o balanço de massa das amostras de lodo (ver Anexo 6) verificou-se que foi possível chegar a um teor de umidade de aproximadamente 5% com a secagem.

Na figura 14 é possível comparar as amostras provenientes da mesma empresa, utilizadas no experimento em laboratório e em secador industrial.

Figura 14. Amostras de lodo antes e após secagem: (a) em laboratório e (b) na indústria.



Fonte: Primária (2017)

Observou-se que durante a secagem, mesmo considerando o baixo volume de sólidos (aproximadamente 3 kg), há liberação de fortes e desagradáveis odores. Vega *et al.* (2014) afirmam que durante a secagem de lodos industriais, há grande preocupação com relação à produção de odores, devido à emissão de compostos de enxofre durante o processo de secagem.

4.3 CARACTERÍSTICAS DA CORRENTE DE EXAUSTÃO DO AQUECEDOR DE FLUIDO TÉRMICO

Quanto às características da corrente de exaustão, fonte do calor residual que se pretende aproveitamento constam de um relatório de análise de emissão atmosférica da chaminé do sistema de exaustão da caldeira, (Anexo 2), sendo as informações mais relevantes destacadas na Tabela 3.

Tabela 3. Características da corrente gasosa de exaustão do aquecedor de fluido térmico.

Parâmetros	1ªcoleta	2ªcoleta	3ªcoleta	Média	
Temperatura (°C)	207	206	209	208	
Pressão na Chaminé (mmhg)	742,7	742,8	742,8	742,8	
Velocidade (m/s)	23,2	24,2	24,0	23,8	
Vazão do efluente gasoso	Na chaminé (m ³ /h)	25.161,7	26.324,3	26.129,6	25.871,9
	Na CNTP (Nm ³ /h)	10.726,7	11.092,7	11.026,8	10.948,7
Umidade (%)	23,2	24,4	23,7	23,8	

Fonte: Laboratório Orgânica (2016)

4.4 TAXA DE SECAGEM NECESSÁRIA PARA A VAZÃO DE LODO

Conforme cálculos apresentados no Anexo 6, tem-se:

Cenário 1, considerando-se 625 kg/h de lodo:

Para a 1ª fase (fase de aquecimento) tem-se 500 kg/h.

Para a 2ª fase (fase de evaporação) tem-se 125 kg/h.

- A partir da Equação 04 a quantidade de calor necessário para o aquecimento do lodo (q_1) é igual a 9800 kcal/h.
- Com o uso da Equação 05 a quantidade de calor necessário para a evaporação da água (Q_2) é igual 270.000 kcal/h.
- Com o uso da equação 06 a quantidade de calor necessário para o aquecimento da massa de lodo úmida (q_3) é igual a 3850 kcal/h.

- A partir da equação 07 calcula-se a quantidade de calor perdida do secador para o ambiente (q_4) é igual a 18.360 kcal/h.
- **Com a equação 08 a quantidade de calor total (q_t) necessária para a secagem de lodo no cenário 1 é igual a 302.010 kcal/h.**

Cenário 2, considerando-se 208 kg/h de lodo:

Para a 1ª fase (fase de aquecimento) tem-se 166,4 kg de lodo/h.

Para a 2ª fase (fase de evaporação) tem-se 41,6 kg de lodo/h.

- Quantidade de calor necessário para o aquecimento do lodo (q_1) é igual a 3.261,44 kcal/h.
- Quantidade de calor necessário para a evaporação da água (Q_2) é igual 89.856 kcal/h.
- Quantidade de calor necessário para o aquecimento da massa de lodo úmida (q_3) é igual a 1281,28 kcal/h.
- Quantidade de calor perdida do secador para o ambiente (q_4) é igual a 8.840 kcal/h.
- **Quantidade de calor total (q_t) necessária para a secagem de lodo no cenário 2 é igual a 103.238,72 kcal/h.**

4.5 QUANTIDADE DE CALOR DISPONÍVEL NO AQUECEDOR DE FLUIDO TÉRMICO PARA APROVEITAMENTO COM A FINALIDADE DE SECAGEM DO LODO

De acordo com os cálculos apresentados no memorial de cálculo (Anexo 6), com o uso da equação 09, o calor residual (q_5) é igual a **347.631 kcal/h.**

Considerando-se os resultados obtidos no item 4.4, que representam a quantidade de calor necessária para a secagem necessária para a vazão de lodo na empresa e o valor obtido no item 4.5, tem-se que há possibilidade de aproveitamento deste calor, uma vez que o calor disponível é maior que o necessário para a secagem de lodo, conforme vazão existente na empresa.

4.6 ESCOLHA DO SECADOR

Respondendo ao questionário proposto por Van't Land (1991), tem-se:

Informações gerais

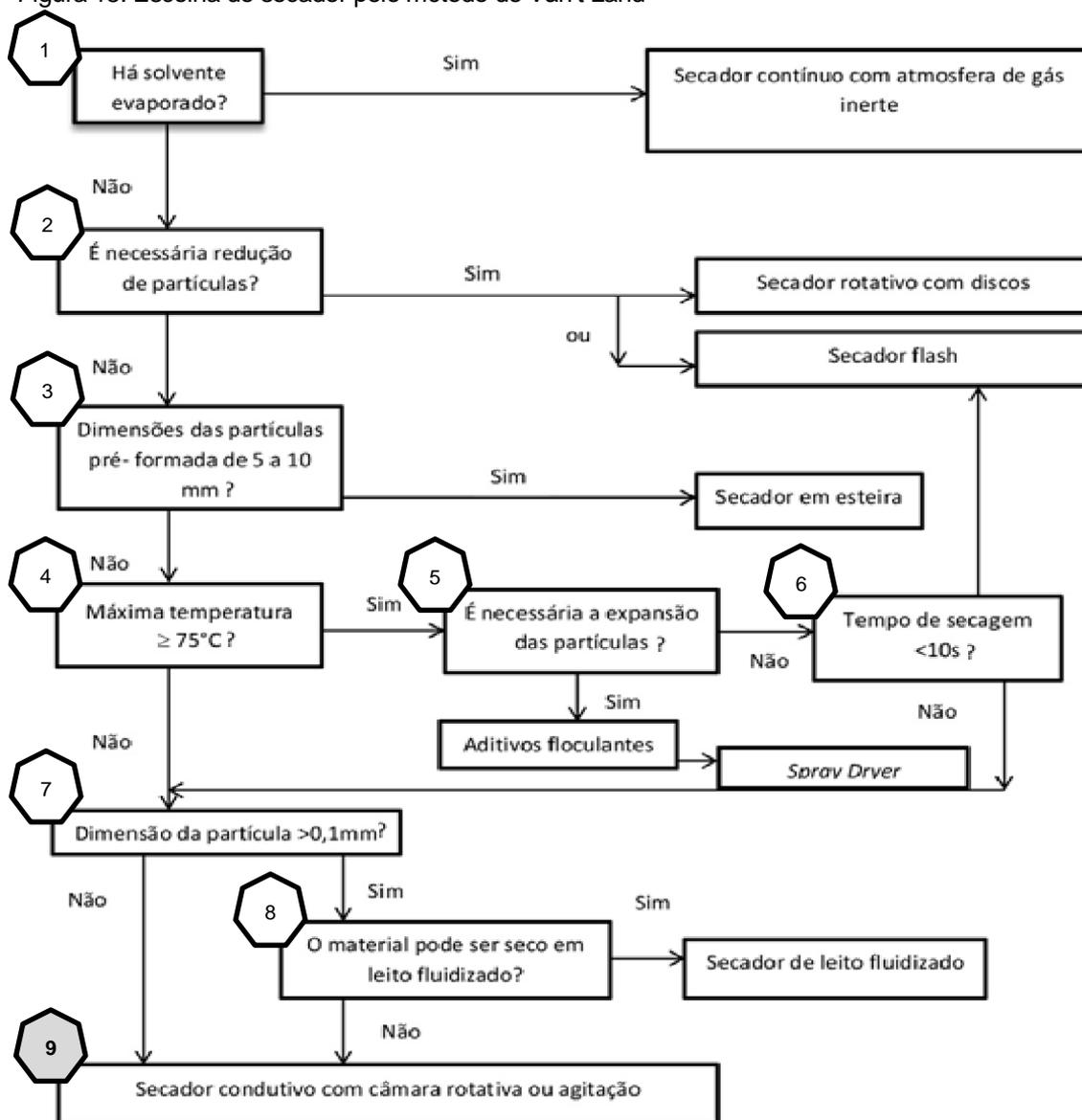
- a) Capacidade de produção (kg/h) - 208 a 625 kg/h
- b) Umidade inicial do material – 80 %
- c) Dimensão da partícula – aproximadamente 8mm após secagem
- d) Curva de secagem - rápida.
- e) Temperatura máxima suportada pelo produto – não aplicável
- f) Informações sobre risco de explosão (vapor/ar e pó/ar) – não aplicável
- g) Propriedades toxicológicas – não aplicável
- h) Experiência adquirida – não aplicável
- i) Isotermas de sorção – não obtido
- j) Contaminação pelo gás da queima – não aplicável
- k) Aspectos de corrosão – material levemente corrosivo.
- l) Dados físicos relevantes sobre os materiais - pegajoso

2. Critérios sobre o produto seco

- a) Conteúdo de umidade – faixa entre 5 a 20 %
- b) Dimensões da partícula – não avaliado.
- c) Densidade aparente – $0,7991 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ em base úmida.
- d) Rigidez – não aplicável
- e) Quantidade de pó – Finos após secagem. A produção de finos é maior em secagens superiores a 20 %.
- f) Características do fluxo – amostra glutinosa.
- g) Cor - parda.
- h) Odor – forte e desagradável.
- i) Sabor – não aplicável.
- j) Aparência - granulada.
- k) Dispersão – não aplicável.
- l) Comportamento de reabsorção e adsorção – forte tendência a reabsorção
- m) Tendência a aglomeração - sim.
- n) Segregação do produto – não aplicável.

Seguindo o fluxograma proposto por VAN'T LAND (1991) para a seleção de secadores contínuos, obteve-se a melhor escolha como sendo o secador condutivo com câmara rotativa ou agitação, conforme Figura 15.

Figura 15. Escolha do secador pelo método de Van't Land



Fonte: Van't Land (1991).

Considerando-se as características do lodo têxtil, alguns fatores foram determinantes para a escolha do secador como, por exemplo, a não preocupação com limites de temperatura, devido aos danos que podem ser causados aos sólidos, como ocorrem em produtos alimentícios, por exemplo. Devido ao aspecto pegajoso, a não fluidização do lodo também foi um fator

determinante para a escolha do secador, conforme pode ser observado no fluxograma.

A partir do modelo de secador escolhido, ou seja, secador condutivo com câmara rotativa ou agitação, a empresa fabricante destes equipamentos sugeriu dois modelos para atender às situações propostas anteriormente (Cenário 1 e Cenário 2). Conforme pode ser observado na Tabela 4 são apresentados dois secadores, para regimes de funcionamento de 8 e 24 horas, respectivamente. É possível observar que tais equipamentos possuem valores diferentes, assim como capacidades de secagem, potência e quantidade de massa evaporada. Porém a redução mássica, redução volumétrica, densidade de entrada e de saída são iguais entre os dois equipamentos. Levando-se em consideração os valores apresentados na Tabela 4, os fatores potência e regime de funcionamento são fundamentais para a determinação do consumo de energia e, conseqüentemente, para o estudo de viabilidade sobre o uso destes equipamentos.

Tabela 4. Dados dos secadores selecionados para as situações de secagem propostas.

SECADOR	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2
Dimensões	Ø 2,4 m X 6 m	Ø 1,5 m X 4,8 m
Capacidade de secagem	625 kg/h	300 kg/h
Umidade de entrada	80%	80%
Umidade de saída	10%	10%
Massa de água evaporada	485 kg/h	194 kg/h
Redução mássica	04:01	04:01
Redução volumétrica	3,3:1	3,3:1
Densidade de entrada	800 kg/m ³	800 kg/m ³
Densidade de saída	660 kg/m ³	660 kg/m ³
Potência elétrica	45 W	15 W
Valor do equipamento	R\$ 980.000,00	R\$ 600.000,00

Fonte: Primária (2017)

4.7 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA OS CENÁRIOS PROPOSTOS

A quantidade mensal de lodo destinada ao aterro industrial é em torno de 150 toneladas, com um custo de R\$ 200,00 por tonelada de lodo. Adicionando-

se os fretes aos custos com este material, têm-se valores superiores a R\$ 35.000,00 mensais. É possível observar na Tabela 5 o valor gasto mensalmente com a destinação de lodo úmido, ou seja, R\$ 35.400,00, incluindo-se os fatores transporte e destinação em aterro, contemplados nos cálculos. A Tabela 6 mostra os valores gastos com o lodo seco nos dois regimes de funcionamento propostos, 24 horas e 8 horas, respectivamente. Além disso, apresenta a análise econômica para os dois regimes e mostra o prazo de retorno do investimento nos dois cenários.

Tabela 5. Custo mensal com a destinação do lodo úmido

CUSTOS	QUANTIDADE MENSAL	VALOR UNITÁRIO (R\$)	VALOR MENSAL (R\$)
Transporte do lodo úmido (frete)	36 fretes	150,00	5400,00
Destinação ao aterro	150 ton	200,00	30000,00
Valor total para a destinação			35.400,00

Constata-se, para ambos os cenários, que a secagem do lodo é economicamente viável. Considerando-se o valor a ser investido e a economia mensal gerada com a secagem do lodo, é possível observar que o regime de secagem com o menor tempo de retorno é o apresentado para o Cenário 2, 23 meses. Segundo Dal Farre (2004) as vantagens do indicador de retorno simples estão na facilidade de cálculo e em considerar os fluxos de caixa ao invés do lucro. As desvantagens estão na necessidade de estabelecer um período máximo aceitável, não considerar os fluxos de caixa após o período de retorno do investimento e não ser aplicado quando o fluxo de caixa não é convencional.

Tabela 6. Custo mensal com a destinação do lodo seco para o regime de secagem de 8 e 24 horas por dia, economia gerada com o uso de calor residual e retorno do investimento

Itens	Regime 8 h/dia			Regime 24h/dia		
	Quantidade mensal	Valor Unitário (R\$)	Valor Mensal (R\$)	Quantidade	Valor unitário	Valor mensal
Transporte do lodo seco (frete)	11 fretes	150,00/un	1.650,00	11 fretes	150,00/un	1.650,00
Destinação ao aterro	30 toneladas	120,00/t	3.600,00	30 toneladas	120,00/t	3.600,00
Consumo de energia elétrica	45 kW/h 192 horas	0,4/ kW	3.456,00	15 kW/h 576 horas	0,4/ kW	3.456,00
Custos com combustível	0	0	0	0	0	0
Manutenção do equipamento	0,02/12	980.000,00	1.633,00	0,02/12	600.000,00	1000,00
Valor total mensal para a destinação		R\$ 10.339,00			R\$9.706,00	
Economia mensal		R\$ 25.061,00			R\$25.694,00	
Retorno do investimento		39 meses			23 meses	

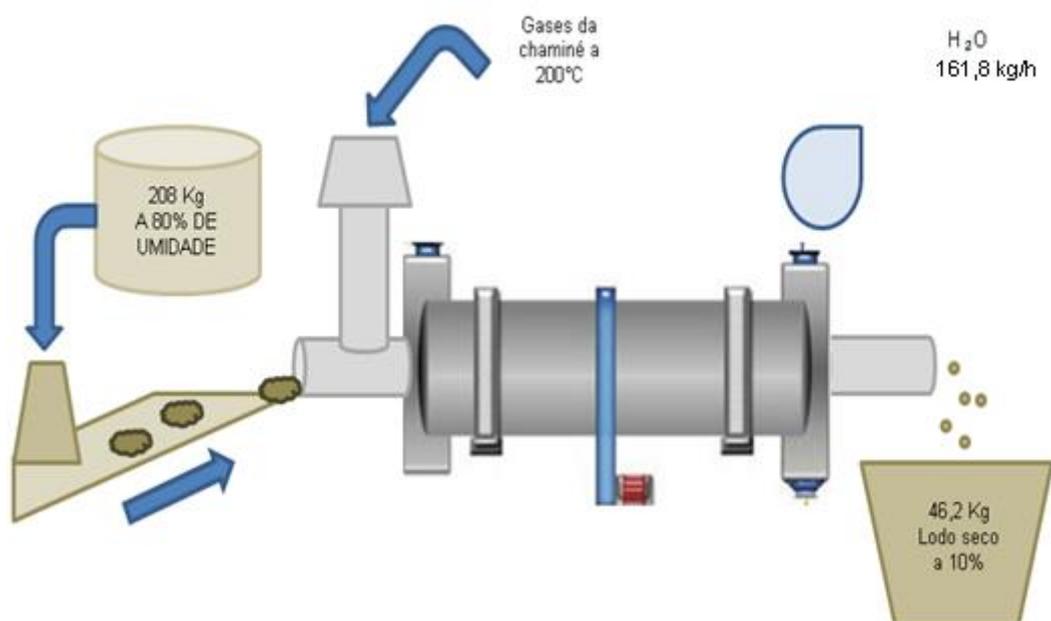
Para o regime de funcionamento de 8 horas, Cenário1, o retorno sobre o investimento ocorrerá em 39 meses, superior ao que a maioria das empresas considera como prazo ideal de 36 meses, um limite para o retorno sobre o capital investido. Brückner *et al.*, (2015), em uma investigação de potencial do calor residual industrial, demonstram que o máximo custo de investimento aceitável para cada tecnologia é estimado e comparado com o custo de investimento em função das horas de funcionamento do sistema, sendo o fator anuidade o mais importante.

A economia gerada com a secagem térmica do lodo têxtil não é o único benefício gerado. Fatores ambientais são envolvidos como a economia de energia elétrica com o uso do calor residual para a secagem, admitindo-se as crises com o fornecimento deste tipo de energia e a segurança, são fatores implícitos no uso destes equipamentos. Ferrace *et al.*, (2002) mostram que as tecnologias de secagem com o uso de secadores do tipo agitadores apresentam as seguintes vantagens para o tratamento de lodo: nenhuma poluição no meio de transporte de calor, confinamento de vapor e odor, redução dos riscos de incêndio e explosão, uma vez que o nível de oxigênio é baixo no secador.

4.8 BALANÇO DE MASSA COM O USO DO SECADOR SELECIONADO

Utilizando-se as características fornecidas pelo fabricante do secador selecionado como sendo o de melhor tempo de retorno, apresenta-se o balanço de massa (Figura 16). No uso do calor residual, emitido por gases da chaminé, para a secagem de 208 kg/h de lodo úmido é possível observar a perda de massa de água durante o processo e o resultado final da secagem, com a saída de lodo seco.

Figura 16. Balanço de massa no regime de funcionamento de maior viabilidade econômica



Fonte: Primária (2017)

Portanto, para o regime de 24 horas de funcionamento, tem-se a entrada de 208 kg de lodo úmido a 80%, 161,8 kg/h de evaporação de água e saída de 46,2 kg/h, a 10% de umidade.

A secagem constitui um processo importante para a gestão das lamas de águas residuais, pois pode reduzir a massa e o volume do produto e, conseqüentemente, reduzir os custos de armazenamento, manuseio e transporte. Além disso, o lodo seco apresenta menos riscos de contaminação ao lençol freático.

Algumas vantagens na secagem do lodo industrial têxtil são a não preocupação com a temperatura ou tempo total de secagem, que possam causar danos físicos aos sólidos submetidos ao processo, como ocorre na indústria alimentícia, por exemplo. Além disso, não há preocupação com o tamanho final das partículas. Estes fatores se mostram importantes para promover uma liberdade maior para projetos, construção ou escolha destes equipamentos ou ainda na definição do processo de secagem.

Os experimentos mostraram que após a secagem é possível chegar a um teor de umidade de 5%, porém, devido à formação de pele ao redor do lodo, esse processo eleva o tempo de secagem e, conseqüentemente, os custos envolvidos.

A análise de viabilidade econômica mostrou que há vantagem no aproveitamento de calor residual para a secagem de lodo, indicando que o uso de secador de tambor rotativo é viável para o regime de 24 horas de funcionamento do equipamento.

Além das vantagens econômicas no aproveitamento de calor residual da chaminé de um aquecedor de fluido térmico, fatores ambientais também se mostram relevantes, a exemplo da economia de energia elétrica para a secagem, a não necessidade no uso de outros combustíveis como forma de energia e a segurança no uso destes equipamentos pelos operadores e para o patrimônio da empresa durante processos de secagem térmica.

CONCLUSÃO

O aproveitamento do calor residual gerado por um aquecedor de fluido térmico em uma empresa do ramo têxtil se mostrou com uma alternativa economicamente viável.

O lodo em estudo, mesmo após processo de deságue em centrífuga apresentou teor de umidade de aproximadamente 80%, de acordo com os testes realizados em laboratório. Os custos que envolvem a destinação do lodo úmido pela empresa para aterro industrial, incluindo os custos com transporte do material, são de aproximadamente R\$ 35.0000/ mês.

Os resultados dos testes de secagem de amostras de lodo, coletadas após processo de deságue na centrífuga, realizados em um secador de leito fixo em laboratório, apresentaram valor de teor de umidade final próximo a 5%. Além disso, observou-se que a formação de “pele” e de fissuras nas partículas de lodo durante a secagem influenciam diretamente na velocidade de secagem. A “pele” dificulta a evaporação de água presente no lodo e as fissuras favorecem a perda de água do material, em um processo de secagem. Além da redução mássica das amostras de lodo, também foi observada a redução volumétrica do material, durante a secagem.

Considerando-se as características do lodo têxtil, antes e após secagem, determinou-se que o melhor secador é o de câmara rotativa ou agitação.

A partir dos cálculos realizados foi possível determinar que a quantidade de calor disponível no aquecedor de fluido térmico para aproveitamento com a finalidade de secagem do lodo é de 347.631 kcal/h.

Em relação à quantidade de calor necessária para a secagem do lodo com o uso de secador de tambor rotativo com aproveitamento de calor residual, tem-se que, para o cenário 1, a quantidade de calor necessária é igual a 302.010 kcal/h e para o cenário 2, 103.238,72 kcal/h.

Por fim, a partir dos cálculos realizados, concluiu-se que o cenário 2 apresentou-se como mais vantajoso economicamente, sendo que ocorrerá o retorno do investimento em 23 meses.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando-se que, durante o desenvolvimento deste trabalho, surgiram ideias e informações que não foram possíveis de implementar ou obter, sugere-se alguns estudos a serem executados:

- Além do secador de tambor rotativo, sugere-se testes em secador do tipo spray dryer e esteiras, pois estes modelos também mostraram importância durante o andamento destes trabalhos, sendo possível melhorar a eficiência e a redução no tempo de secagem a partir da movimentação do lodo no interior do equipamento, promovendo o maior contato entre a superfície a ser seca e conseqüentemente maior evaporação da água no interior do sólido.
- A secagem do lodo têxtil pode apresentar emissões atmosféricas importantes sendo recomendado uma análise do material particulado gerado durante a secagem.
- A utilização do lodo seco como adubação, também merece atenção, uma vez que ainda existem poucos estudos comprovando a eficiência do material para este fim.

REFERÊNCIAS

ABIT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO). **Agenda de competitividade da indústria têxtil da confecção brasileira: O poder da moda.** Disponível em: <<http://www.abit.org.br/adm/Arquivo/Publicacao/120429.pdf>>. Acesso em 10 fev. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2004. Resíduos sólidos – classificação: NBR-10004. Rio de Janeiro: ABNT 63p.

ANDREAUS, J.; DALMOLIN M.C.; IGUATEMY, B. de O.J. e BARCELLOS, I.O. Aplicação de ciclodextrinas em processos têxteis. **Química Nova**, v.33, n.4, p.929-937, 2010.

ANDREOLI, C.V.; Von SPERLING, M.; FERNANDES, Fernando: **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**, v.6: Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final. Belo Horizonte – UFMG, 2001.

ARLABOSSE, P.; CHAVEZ, S.; PREVOT, C. Drying of municipal sewage sludge: from a laboratory scale batch indirect dryer to the paddle dryer. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v.22, n.2, p.227-232, 2005.

ARZBAECHER, C.; FOUICHE, E.; PARMENTER, K. Global Energy Partners (2007) Industrial Waste-Heat Recovery: Benefits and Recent Advancements in Technology and Applications. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry. Disponível em: <<http://aceee.org/files/proceedings/2007/data/papers/052048.pdf>> Acesso em: jan/2016.

ASIA, I. O.; OLADOJA, N. A.; BAMUZA-PEMU, E. E. Treatment of textile sludge using anaerobic technology. **African Journal of Biotechnology**, v. 5, n. 18, 2006.

BABU B.R.; PARANDE A.K.; RAGHU S.; KUMAR T.P. An overview of wastes produced during cotton textile processing and effluent treatment methods. **Journal of Cotton Science**, V11,p.110-120, 2007.

BENNAMOUN, L., ARLABOSSE, P., & LÉONARD, A. Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 28, 29-43, 2013

BENNAMOUN, L. Solar drying of wastewater sludge: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 16(1), 1061-1073, 2012.

BORGES, E.S.M.; GODINHO, V. M.; BEJAR, D.O.; CHERNICHARO, C.A.L. Tratamento térmico de lodo anaeróbio com utilização do biogás gerado em reatores UASB: avaliação da autossustentabilidade do sistema e do efeito sobre a higienização e a desidratação do lodo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.14, n.3, p.337-346, 2009.

BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S. H. W. Caracterização e estudo da potencialidade de lodos de efluentes doméstico e industrial como combustível na geração de energia. **Ciência e Engenharia**, V.17, p.27-32, 2008.

BRITTO, J.M.; RANGEL, M.D.O.C. Processos avançados de oxidação de compostos fenólicos em efluentes industriais. **Química Nova**, v.31, n.1, p.114-122, 2008.

BRÜCKNER, S.; LIU, S.; MIRÓ, L.; RADSPIELER, M.; CABEZA, L. F.; LÄVEMANN, E. Industrial waste heat recovery technologies: an economic analysis of heat transformation technologies. **Applied Energy**, v. 151, p.157-167, 2015.

Callegari Spavier, L., Wanke, R., & Ponzio Vaccari, K. Estudo da distribuição da água livre em lodo de esgoto através da técnica termogravimétrica. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental No. 22; V Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental**. ABES, 2003. p. 1-9.

CARTA PSICOMÉTRICA. Disponível em <http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/CartaPsy.htm>. Data de acesso: 15 de out. de 2016.

CARREIRA, M.F. **Sistemas de tratamento de efluentes têxteis: análise comparativa entre as tecnologias usadas no Brasil e na Península Ibérica.** 2006. 674 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina. 2006.

CHEQUER, F. M. D., DE OLIVEIRA, D. P., FERRAZ, E. R. A., DE OLIVEIRA, G. A. R., CARDOSO, J. C., & ZANONI, M. V. B. Textile dyes: dyeing process and environmental impact. **InTech**, p. 151-17, 2013.

CHUN, Y.N., LIM, M.S. AND YOSHIKAWA, K. Development of a high-efficiency rotary dryer for sewage sludge. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, V.14, p. 65 -73, 2012.

DENG, W. Y., YAN, J. H., LI, X. D., WANG, F., LU, S. Y., CHI, Y., & CEN, K. F. Measurement and simulation of the contact drying of sewage sludge in a Nara-type paddle dryer. **Chemical Engineering Science**, v. 64, n. 24, p. 5117-5124, 2009.

DAL FARRA, F. C. P. **Análise econômico-energética de utilização de resíduo industrial florestal para geração de energia térmica: um estudo de caso.** 2004. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2004.

DOJČINOVIĆ, B. P.; ROGLIĆ, G.M.; OBRADOVIĆ, M.B.; KURAIĆ, M.K.; KOSTIĆ, M.M.; NESIĆ, J.; DRAGAN, D.M. Decolorization of reactive textile dyes using water falling film dielectric barrier discharge. **Journal of Hazardous Materials**. v. 192, n. 2, p. 763-771, 2011.

DOMINGUEZ, A. Sewage sludge drying using microwave energy and characterization by IRTF. **Afinidad**, v. 61, n. 512, p. 280-285, 2004.

EL-HALWAGI, Mahmoud M. **Process Integration (Process systems engineering. v. 7.** Academic Press, 2006

EL-HALWAGI, Mahmoud M. **Sustainable design through process integration: fundamentals and applications to industrial pollution prevention, resource conservation, and profitability enhancement.** Elsevier, 2011.

FERRASSE, J. H.; ARLABOSSE, P.; LECOMTE, D. Heat, momentum, and mass transfer measurements in indirect agitated sludge dryer. **Drying Technology**, v. 20, n. 4-5, p. 749-769, 2002.

FLAGA, A. Sludge drying. *In: Proceedings of Polish-Swedish seminars, Integration and optimization of urban sanitation systems. Cracow March.* 2005. p. 17-18.

FONT, R., GOMEZ-RICO, M.F. AND FULLANA, A. Skin effect in the heat and mass transfer model for sewage sludge drying. **Separation and Purification Technology**, v.77, n.1, p.146-161. 2011.

GHALY, A. E.; ANANTHASHANKAR, R.; ALHATTAB, M.; RAMAKRISHNAN, V. V. (2014) Production, Characterization and Treatment of Textile Effluents: A Critical Review. **J Chem Eng Process Technol**; vol 5: 182.

GIRALDO, L. F. G. Y MESA, G. A. P.; Tratamiento de las aguas residuales de una industria textil utilizando colector solar. **Revista Lasallista de Investigación. Antioquia**, v. 4 No. 2, pp. 24-31, 2007.

KON, A.; COAN, D.C. Transformações da indústria têxtil brasileira: a transição para a modernização. **Revista de Economia Mackenzie**, v.3, n.3, p.11-34, 2005.

KUNZ, A; ZAMORA. P.P.; MORAES, S.G. E DURÁN, N. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**, v. 25, N°1, p. 78-82, 2002.

LAGO, A.L; ELIS, V.R. E GIACHETI, H.L. Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 3, p. 357-374, 2006.

LÉONARD, ANGÉLIQUE ET AL. Influence of back mixing on the convective drying of residual sludges in a fixed bed. **Water Research**, v. 42, n. 10, p. 2671-2677, 2008.

LOBATO, L.C.S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores uasb tratando esgoto doméstico**. 2011.184 f. *Tese* (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2011.

NOWICKI, CASSANDRE; GOSSELIN, LOUIS. An overview of opportunities for waste heat recovery and thermal integration in the primary aluminum industry. **JOM**, v. 64, n. 8, p. 990-996, 2012.

OHM, T.I.; CHAE, J.S.; KIM, J.E.; KIM, H.K.; MOON, S.H. A study on the dewatering of industrial waste sludge by fry-drying technology. **Journal of Hazardous Materials**, v. 168, p.445–450, 2009.

OLADOJA, N. A. AND BAMUZA – PEMU E.E. Treatment of textile sludge using anaerobic technology. **African Journal of Biotechnology**, p. 1678-1683, 2001.

OLULEYE, G., JOBSON, M., SMITH, R., & PERRY, S. J. (2016). Evaluating the potential of process sites for waste heat recovery. **Applied Energy**, v. 161, p. 627-646, 2016

PARK, K. J. B., ALONSO, L. F. T., CORNEJO, F. E. P., FABBRO, I. D., & PARK, K. J. Seleção de secadores: fluxograma. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 9, n. 2, p. 179-202, 2007.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; DE OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. (2007) Conceitos de Processo e Equipamentos de Secagem. Campinas. Disponível

em: <<http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>>. Acesso em 10 de nov. de 2016.

PEREIRA, Wellington S.; FREIRE, Renato S. Ferro zero: uma nova abordagem para o tratamento de águas contaminadas com compostos orgânicos poluentes. **Química Nova**, v. 28, n. 1, p. 130-136, 2005.

PRADO, M. V., Relatório Setorial da Indústria Têxtil Brasileira. ABIT/IEMI, v. 8, n. 8, p. 152, 2013.

PRUKWARUN, W., KHUMCHOO, W., SEANCOTR, W., & PHUPAICHITKUN, S. CFD simulation of fixed bed dryer by using porous media concepts: Unpeeled longan case. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 6, n. 1, p. 100 -110, 2013.

PULAT, E.; ETEMOGLU, A. B.; CAN, M. Waste-heat recovery potential in Turkish textile industry: Case study for city of Bursa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 3, p. 663-672, 2009.

RAMOS, F. M., KAMINATA, O. T., TAVARES, C. R. G., BENATTI, C. T., CAPELASSO, M., & INNOCENTI, B. D. Avaliação da técnica de solidificação/estabilização no tratamento de resíduo têxtil-produção de bloco cerâmico de vedação. **Cerâmica**, v. 55, p. 408-414, 2009.

DE LIMA REDA, A. L., & SATO, K. I. PESQUISA DE GRADUAÇÃO: ANÁLISE DAS POSSIBILIDADES DE USO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO NA GRANDE SÃO PAULO. In: **Proceedings of International Conference on Engineering and Computer Education**. 2014.

RIBEIRO, R. B; ARAÚJO, A. O. E CRYSTALINO, C. M. TAVARES A. DE L. Impacto da não preservação ambiental no resultado de uma indústria têxtil da região metropolitana de natal. **Revista Universo Contábil, Blumenau**, v. 6, n. 3, p. 80-95, 2010.

ROSA, A. P., LOBATO, L. C. D. S., BORGES, J. M., MELO, G. C. B. D., & CHERNICHARO, C. A. D. L. (2016). Energy potential and alternative usages of biogas and sludge from UASB reactors: case study of the Laboreaux wastewater treatment plant (Itabira). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, n. 2, p. 315-328, 2016.

ROSA, E. V. C. Reaproveitamento de lodo têxtil em solo florestal: estudos dos aspectos físico-químicos, agrônômicos e ecotoxicológicos. 2004. 126 f. Tese (Doutorado em Química). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2004.

SANTOS, C.; **Prevenção à poluição industrial: identificação de oportunidades, análise dos benefícios e barreiras.** 2005.287f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Universidade de São Carlos, São Carlos. 2005.

SONI, H.I.; BAKRE, P.P.; BHATNAGAR, P. Assessment of teratogenicity and embryotoxicity of sludge from textile industries at pali (India) in swiss albino mice exposed during organogenetic period. *Journal of Environmental Biology*, v. 29, n. 6, p. 965-969, 2008.

TEIXEIRA, A. A., CARVALHO, M. C., & DE MELO LEITE, L. H. Análise de viabilidade para a implantação do Sistema de energia solar residencial. *E-xacta*, v. 4, n. 3, 2012.

UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2006). Thermal Energy Equipment: Waste Heat Recovery. Energy Efficiency Guide for Industry in Asia. Disponível em: <www.energyefficiencyasia.org> Acesso em: Jan, 2016.

UTLU, Z., HEPBAŞLI, A. Exergoeconomic analysis of energy utilization of drying process in a ceramic production. *Applied Thermal Engineering*, v. 70, n. 1, p. 748-762, 2014.

VEGA, E.; MONCLÚS, H.; GONZALEZ-OLMOS, R.; MARTIN, M.J. Optimizing chemical conditioning for odour removal of undigested sewage sludge in drying processes. **Journal of environmental management**, v. 150, p. 111-119, 2015.

WAKEMAN, R. J. Separation technologies for sludge dewatering. **Journal of hazardous materials**, v. 144, n. 3, p. 614-619, 2007.

VIKLUND, S. B., & JOHANSSON, M. T. Technologies for utilization of industrial excess heat: potentials for energy recovery and CO₂ emission reduction. **Energy Conversion and Management**, v. 77, p. 369-379, 2014

YAN, J. H., DENG, W. Y., LI, X. D., WANG, F., CHI, Y., LU, S. Y., & CEN, K. F. Experimental and theoretical study of agitated contact drying of sewage sludge under partial vacuum conditions. **Drying Technology**, v. 27, n. 6, p. 787-796, 2009.

YE, B., LIU, J., XU, X., CHEN, G., & ZHENG, J.. A new open absorption heat pump for latent heat recovery from moist gas. **Energy Conversion and Management**, v. 94, p. 438-446, 2015.

ZHANG, G.; ZHANG, P.; CHEN, Y. Ultrasonic enhancement of industrial sludge settling ability and dewatering ability. **Tsinghua Science & Technology**, v.11, n.3, p.374-378, 2006.

ANEXOS

ANEXO 1

Análise de Lodo da ETE

(Estação de Tratamento de Efluentes da empresa)

RESULTADO DAS ANÁLISES ACREDITADAS PELA ISO/IEC 17025

Análise	Nº do Equipamento	Resultado	Método	LQ	Valor Máximo Permitido	Data da Análise
Arsênio	ICP - 725	< 0,001 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,001 mg/L	NBR 10.004 - Lixiviado: 1,0 mg/L	08/10/2015
Bário	ICP - 725	0,058 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,001 mg/L	NBR 10.004 - Lixiviado: 70,0 mg/L	01/10/2015
Cádmio	ICP - 725	0,010 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,001 mg/L	NBR 10.004 - Lixiviado: 0,5 mg/L	01/10/2015
Chumbo	ICP - 725	0,038 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,010 mg/L	NBR 10.004 - Lixiviado: 1,0 mg/L	01/10/2015
Cromo total	ICP - 725	0,026 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,005 mg/L	NBR 10.004 - Lixiviado: 5,0 mg/L	01/10/2015
Fluoretos	Espectrofotometro Pharo - 719	2,11 mg/L	Standard Methods 22a Edição - 4500 F - E	0,3 mg/L	NBR 10.004 - Lixiviado: 150 mg/L	24/09/2015
Mercúrio	ICP - 725	< 0,0010 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,0010 mg/L	NBR 10.004 - Lixiviado: 0,1 mg/L	08/10/2015
Prata	ICP - 725	< 0,005 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,005 mg/L	NBR 10.004 - Lixiviado: 5,0 mg/L	01/10/2015
Selênio	ICP - 725	0,005 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,001 mg/L	NBR 10.004 - Lixiviado: 1,0 mg/L	08/10/2015

RESULTADO DAS ANÁLISES ACREDITADAS PELA ISO/IEC 17025 PARA LABORATÓRIOS TERCEIROS

Análise	Nº do Equipamento	Resultado	Método	LQ	Valor Máximo Permitido	Data da Análise
Benzeno*	Cromatógrafo Gasoso com Detector de Massa - ASL2011	< 0,130 mg/L	EPA 8260 B/C, 5021 A.	0,130 mg/L	NBR 10.004 - Lixiviado: 0,5 mg/L	27/09/2015

Análise	Nº do Equipamento	Resultado	Método	LQ	Valor Máximo Permitido	Data da Análise
Tetracloroetileno Água*	Cromatógrafo a gás - MS - 028	< 0,260 mg/L	EPA 8260 B/C, 5021 A.	0,260 mg/L	NBR 10.004 - Lixiviado: 4,0 mg/L	27/09/2015

Benzeno*: Laboratório de Ensaio BIOAGRI acreditado pela Cgcre de acordo com ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0172

Tetracloroetileno Água*: Laboratório de Ensaio BIOAGRI acreditado pela Cgcre de acordo com ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0172

LQ = Limite de Quantificação

PI = Presença de Interferentes

RESULTADO DAS ANÁLISES NÃO ACREDITADAS PELA ISO/IEC 17025

Análise	Nº do Equipamento	Resultado	Método	LD	Valor Máximo Permitido	Data da Análise
Adição da Solução de Lixiviação	Vidraria Geral - 441	Ácido acético + NAOH	NBR 10.005 - Lixiviação	-	--	22/09/2015
Massa Lixiviada	Balança Analítica - 540	50,00 g	NBR 10.005 - Lixiviação	- g	NBR 10.004 - Lixiviado: 50,000 100,000 g	22/09/2015
pH Final Lixiviação	pHmetro Bancada - Quimis - 619	5,14	ABNT NBR 14339:1999	1,0	--	23/09/2015
pH Inicial Lixiviação	pHmetro Bancada - Quimis - 619	5,05	ABNT NBR 14339:1999	1,0	--	22/09/2015
Tempo Total de Extração	Agitador automático de não volátil - 628	19,00 Horas	NBR 10.005 Lixiviação / CONSEMA Nº 26	- Horas	--	23/09/2015
Volume Líquido Extraído	Proveta 500 mL - 110366	900,00 mL	NBR 10.005 - Lixiviação	- mL	--	23/09/2015

LD = Limite de Detecção

PI = Presença de Interferentes

RESULTADO DAS ANÁLISES ACREDITADAS PELA ISO/IEC 17025

Análise	Nº do Equipamento	Resultado	Método	LQ	Valor Máximo Permitido	Data da Análise
Arsênio	ICP - 725	< 0,001 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,001 mg/L	NBR 10.004 - Solubilizado: 0,01 mg/L	08/10/2015
Bário	ICP - 725	0,010 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,001 mg/L	NBR 10.004 - Solubilizado: 0,7 mg/L	01/10/2015
Cádmio	ICP - 725	0,006 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,001 mg/L	NBR 10.004 - Solubilizado: 0,005 mg/L	01/10/2015
Chumbo	ICP - 725	0,010 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,010 mg/L	NBR 10.004 - Solubilizado: 0,01 mg/L	01/10/2015
Cianeto Total	Colorimétrico Nova 60 - 327	< 0,020 mg/L	Standard Methods 22a Edição - 4500 CN - E / DIN 38405 D13+14.	0,02 mg/L	NBR 10.004 - Solubilizado: 0,07 mg/L	19/10/2015
Cloreto	Bureta 25 mL - IVMDB9057	224,04 mg/L	Standard Methods 22a Edição - 2120 C.	7,1 mg/L	NBR 10.004 - Solubilizado: 250,0 mg/L	07/10/2015
Cobre	ICP - 725	< 0,005 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,005 mg/L	NBR 10.004 - Solubilizado: 2,0 mg/L	01/10/2015
Cromo total	ICP - 725	0,010 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,005 mg/L	NBR 10.004 - Solubilizado: 0,05 mg/L	01/10/2015
Fenóis Totais	Colorimétrico Nova 60 - 327	< 0,005 mg/L	Standard Methods 22a Edição - 5530 - reação com 4 aminopiridina.	0,005 mg/L	NBR 10.004 - Solubilizado: 0,01 mg/L	19/10/2015
Ferro	ICP - 725	0,348 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,007 mg/L	NBR 10.004 - Solubilizado: 0,3 mg/L	01/10/2015
Fluoretos	Espectrofotometro Pharo - 719	0,34 mg/L	Standard Methods 22a Edição - 4500 F - E.	0,3 mg/L	NBR 10.004 - Solubilizado: 1,5 mg/L	19/10/2015
Manganês	ICP - 725	0,018 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,005 mg/L	NBR 10.004 - Solubilizado: 0,1 mg/L	01/10/2015

Análise	Nº do Equipamento	Resultado	Método	LQ	Valor Máximo Permitido	Data da Análise
Mercúrio	ICP - 725	< 0,0010 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,0010 mg/L	NBR 10.004 - Solubilizado: 0,001 mg/L	08/10/2015
Nitrato-N	Colorímetro Nanocolor - 874	0,6 mg/L	DIN 38405 D9 - ISO 7890/01	0,2 mg/L	NBR 10.004 - Solubilizado: 10,0 mg/L	30/09/2015
Prata	ICP - 725	0,007 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,005 mg/L	NBR 10.004 - Solubilizado: 0,05 mg/L	01/10/2015
Selênio	ICP - 725	< 0,001 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,001 mg/L	NBR 10.004 - Solubilizado: 0,01 mg/L	08/10/2015
Sódio	ICP - 725	7,554 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,200 mg/L	NBR 10.004 - Solubilizado: 200 mg/L	01/10/2015
Sulfato	Colorimétrico Nova 60 - 327	75 mg/L	Standard Methods 22a Edição - 4500 SO4 - E	38 mg/L	NBR 10.004 - Solubilizado: 250 mg/L	19/10/2015
Tensoativos (Surfactantes)	Colorímetro Nanocolor - 874	1,36 mg/L LAS	DIN 38409-H23-1.	0,35 mg/L LAS	NBR 10.004 - Solubilizado: 0,5 mg/L	30/09/2015
Zinco	ICP - 725	0,051 mg/L	Standard Methods 22a 3120 B	0,005 mg/L	NBR 10.004 - Solubilizado: 5,0 mg/L	01/10/2015

LQ = Limite de Quantificação

PI = Presença de Interferentes

RESULTADO DAS ANÁLISES NÃO ACREDITADAS PELA ISO/IEC 17025

Análise	Nº do Equipamento	Resultado	Método	LD	Valor Máximo Permitido	Data da Análise
pH Final Solubilizado	pHmetro Bancada - Quimis - 619	8,40	ABNT NBR 14339:1999	1,0	--	29/09/2015

LD = Limite de Detecção

PI = Presença de Interferentes

RESULTADO DAS ANÁLISES ACREDITADAS PELA ISO/IEC 17025

Análise	Nº do Equipamento	Resultado	Método	LQ	Valor Máximo Permitido	Data da Análise
Corrosividade Resíduo	pHmetro Bancada - Quimis - 619	7,1	NBR 10.004	1-13	NBR 10.004 - Pastoso (Característico): 2,00 a 12,50	22/09/2015
Reação Resíduo	Vidraria Geral - 441	Não	NBR 10.004	-	--	22/09/2015

RESULTADO DAS ANÁLISES ACREDITADAS PELA ISO/IEC 17025 PARA LABORATÓRIOS TERCEIROS

Análise	Nº do Equipamento	Resultado	Método	LQ	Valor Máximo Permitido	Data da Análise
Poder Calorífico Inferior (Base seca)*	Calorímetro - 043	4720 Kcal/Kg	ASTM 240 - 87	206 Kcal/Kg	--	23/09/2015
Poder Calorífico Superior*	Calorímetro - 043	932 Kcal/Kg	ASTM 240 - 87	150 Kcal/Kg	--	23/09/2015

Poder Calorífico Inferior (Base seca)*: Laboratório de Ensaio BIOAGRI acreditado pela Cgcre de acordo com ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0172

Poder Calorífico Superior*: Laboratório de Ensaio BIOAGRI acreditado pela Cgcre de acordo com ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0172

LQ = Limite de Quantificação

PI = Presença de Interferentes

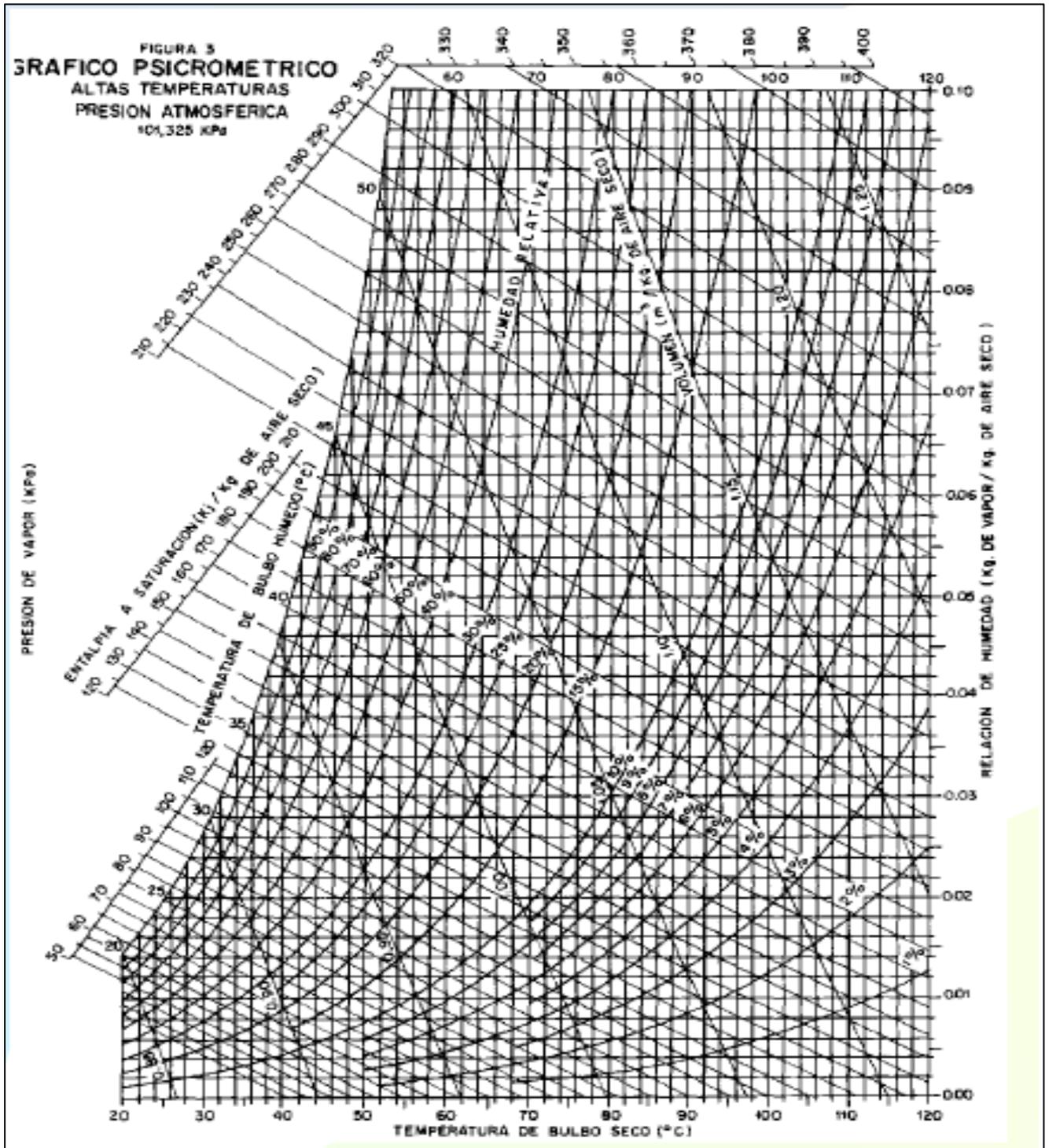
ANEXO 2

Análise das emissões atmosféricas na chaminé do aquecedor de fluido térmico realizado pelo Laboratório Atomus Ambiental

RELATÓRIO		001/2016			
					
10. CARACTERÍSTICAS DO FLUXO GASOSO					
Dados referentes à amostragem isocinética de Material Particulado, realizado em 12/01/2016.					
Parâmetros		1ª Coleta	2ª Coleta	3ª Coleta	Média
Temperatura (°C)		207	206	209	208
Pressão na Chaminé (mmHg)		742,7	742,8	742,8	742,8
Velocidade (m/s)		23,2	24,2	24,0	23,8
Vazão do Efluente Gasoso Seco	Na chaminé (m ³ /h)	25.161,7	26.324,3	26.129,6	25.871,9
	Na CNTP (Nm ³ /h)	10.726,7	11.092,7	11.026,8	10.948,7
Umidade (%)		23,2	24,4	23,7	23,8
Massa Molecular Base Seca (g/mol)		30,4	30,5	30,6	30,5
Massa Molecular Base Úmida (g/mol)		27,5	27,5	27,6	27,5
Volume de Gás Coletado na CNTP (Nm ³)		1,02	1,05	1,05	1,04
Isocinética (%)		104,2	104,5	105,3	104,7

ANEXO 3

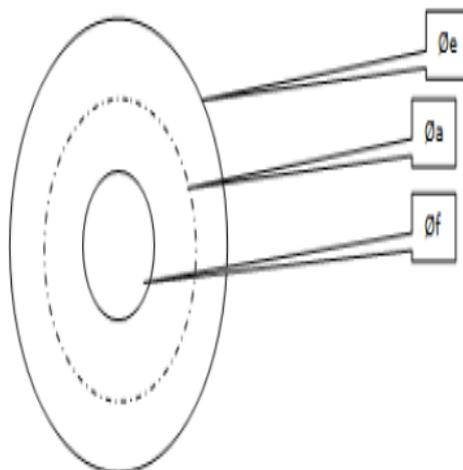
CARTA PSICROMÉTRICA PARA ALTAS TEMPERATURAS



ANEXO 4

Dados do secador de leito fixo/fluidizado utilizado no experimento

PLACAS DE ORIFÍCIO PARA TUBO DE 50 mm: LEITO FIXO - FLUIDIZADO E JORRO



		Descrição					
Placas	Diâmetro externo da Placa = Øe (mm)	Diâmetro aerodinâmico da Placa = Øa (mm)	Diâmetro do Furo da Placa = Øf (mm)	Coefficiente $\beta = (\text{Øf}/\text{Øa})$	Área aerodinâmica (m ²)	Equações de Calibração para Vazão	
Cod.						Q = vazão volumétrica W = vazão mássica Δh = altura diferencial manométrica, em mmCA vertical	
						Q = m ³ /s a 1 atm e 25°C	W = Kg/s
TB-50-10	68,5	42,5	10	0,235	0,001418	Q = 0,0003(√Δh) - 0,0002 Válida no intervalo de 0,00186 a 0,00819 m ³ /s	W = 0,0003(√Δh) - 0,0002 Válida no intervalo de 0,0022 a 0,0097 kg/s
TB-50-20			20	0,471		Q = 0,0013(√Δh) - 0,0003 Válida no intervalo de 0,0068 a 0,0336 m ³ /s	W = 0,0015(√Δh) - 0,0019 Válida no intervalo de 0,008 a 0,040 kg/s
TB-50-30			30	0,706		Q = 0,0032(√Δh) - 0,0018 Válida no intervalo de 0,02141 a 0,0884 m ³ /s	W = 0,0037(√Δh) - 0,0021 Válida no intervalo de 0,025 a 0,0104 kg/s

ANEXO 5

TABELA DE CALOR ESPECÍFICO DO AR A DIFERENTES TEMPERATURAS

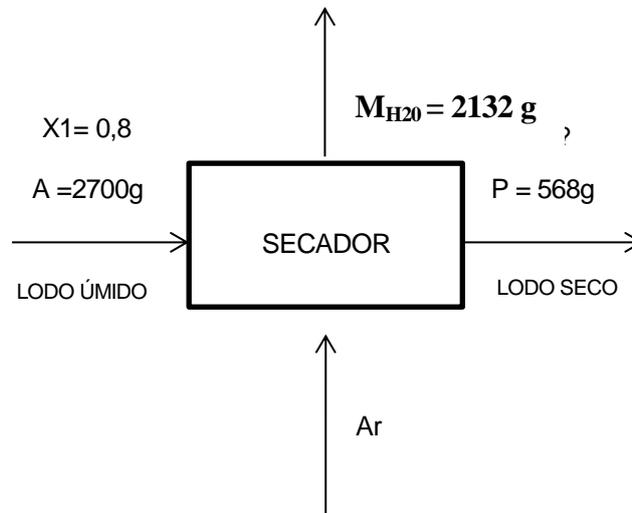
Calor Específico do Ar seco à pressão atmosférica			
Temperatura			Calor Específico (Cp) à pressão constante
°F	K	°C	kJ/kg.K
32	273	0	1,011
68	293	20	1,012
104	313	40	1,014
140	333	60	1,017
176	353	80	1,019
212	373	100	1,022
392	473	200	1,035
572	573	300	1,047
752	673	400	1,059
932	773	500	1,076
<u>1832</u>	<u>1273</u>	<u>1000</u>	<u>1,139</u>

ANEXO 6

MEMORIAL DE CÁLCULO

A) Balanço de massa dos experimentos de secagem em leito fixo

Corrida 1



$$MA = X_1 \times A$$

$$MA = 0,8 \times 2700g$$

$$\mathbf{MA = 2160 g}$$

$$MS = A - MA$$

$$MS = 2700 - 2160$$

$$\mathbf{MS = 540 g}$$

$$MB = P - MS$$

$$MB = 568 g - 540 g$$

$$\mathbf{MB = 28 g}$$

$$M_{H_2O} = MA - MB$$

$$M_{H_2O} = 2160 g - 28 g$$

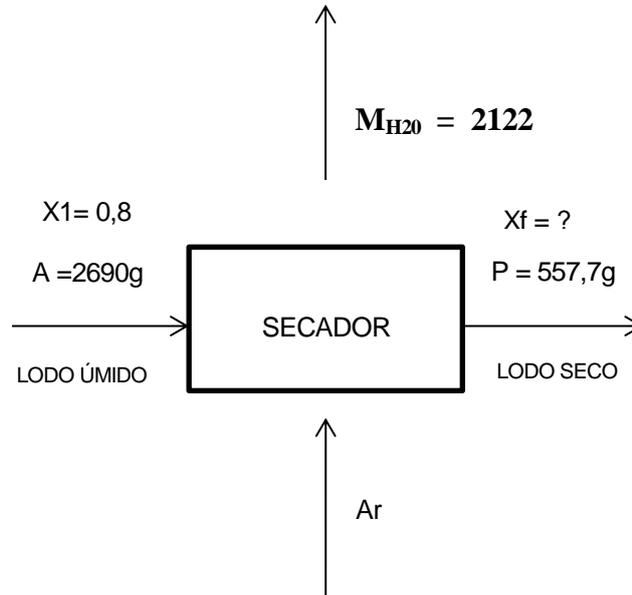
$$\mathbf{M_{H_2O} = 2132 g}$$

Balanço de massa da corrida 1

$$A \times X_{ss_i} = P \times X_{ss_f}$$

$$2700 \times 0,2 = 568 \times X_{ss_f}$$

$$\mathbf{X_{ss_f} = 0,9507}$$

Corrida 2

$$MA = X1 \times A$$

$$MA = 0,8 \times 2690\text{g}$$

$$\mathbf{MA = 2152\text{ g}}$$

$$MS = A - MA$$

$$MS = 2690 - 2152$$

$$\mathbf{MS = 538\text{ g}}$$

$$MB = P - MS$$

$$MB = 568\text{ g} - 538\text{ g}$$

$$\mathbf{MB = 30\text{ g}}$$

$$M_{H2O} = MA - MB$$

$$M_{H2O} = 2152\text{ g} - 30\text{ g}$$

$$\mathbf{M_{H2O} = 2122\text{ g}}$$

Balço de massa da corrida 2

$$A \times X_{ss\ i} = P \times X_{ss\ f}$$

$$2690 \times 0,2 = 557,7 \times X_{ss\ f}$$

$$\mathbf{X_{ss\ f} = 0,9646}$$

CÁLCULOS REFERENTES AO ITEM 4.4

CENÁRIO 1**B) Cálculos das taxas de calor necessárias para a secagem do lodo têxtil****Calor necessário para o aquecimento do lodo na 1ª fase:****Equação 04**

$$q_1 = \dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot \Delta T_1$$

Onde

 q_1 = quantidade de calor necessária para o aquecimento do lodo (kcal/h) \dot{m}_1 = vazão mássica do ar na saída do sistema (kg/h) = 500 kg/h = 500000 g/h c_{p1} = calor específico do gás na corrente de exaustão = 1,022 (kcal/kg·°C) = 0,245 (cal/g·°C) ΔT_1 = diferença entre a temperatura inicial e final do lodo (°C) = 100 °C - 20 °C = 80 °C

$$q_1 = \dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot \Delta T_1$$

$$q_1 = 500000 \cdot 0,245 \cdot 80$$

$$q_1 = 9800 \text{ kcal/h}$$

Calor necessário para a evaporação do lodo na 2ª fase:**Equação 05**

$$Q_2 = m \cdot L$$

Onde

 Q_2 = quantidade de calor necessária para a evaporação (calor latente) (kcal/h) m = quantidade de água a ser evaporada = 500 kg/h = 500.000 g/h L = calor latente da água na vaporização = 540 cal/g

$$Q_2 = m \cdot L$$

$$Q_2 = 500.000 \times 540$$

$$Q_2 = 270.000 \text{ Kcal/h}$$

Calor necessário para o aquecimento da massa úmida de lodo:**Equação 06**

$$q_3 = \dot{m}_3 \cdot c_{p3} \cdot \Delta T_3$$

Onde

q_3 = quantidade de calor necessária para o aquecimento da massa úmida (kcal/h)

\dot{m}_3 = quantidade de massa úmida a ser aquecida (kg/h) = 125 kg/h = 125000 g/h

c_3 = calor específico do lodo = 0,385 (cal/g°C)

ΔT_1 = diferença entre a temperatura inicial e final do lodo (°C) = 100°C - 20°C = 80°C

$$q_3 = \dot{m}_3 \cdot c_{p3} \cdot \Delta T_3$$

$$q_3 = 125000 \cdot 0,385 \cdot 80$$

$$q_3 = 3850 \text{ Kcal/h}$$

Energia perdida (calor) do secador para o ambiente (dissipação):**Equação 07**

$$q_4 = A \cdot h \cdot \Delta T_4$$

Onde

q_4 = quantidade de calor perdida para o ambiente (kcal/h)

A = área do tambor do secador = 54 m²

h = Coeficiente de convecção = 5 Kcal/h m²

ΔT_4 = diferença de temperatura entre a superfície e o interior do secador = 88°C - 20°C

$$q_4 = A \cdot h \cdot \Delta T_4$$

$$q_4 = 54 \cdot 5 \cdot 68$$

$$q_4 = 18.360 \text{ Kcal/h}$$

Quantidade total de energia necessária para a secagem do lodo para o cenário 1:**Equação 08**

$$q_t = q_1 + Q_2 + q_3 + q_4$$

Onde

q_t = quantidade total necessária para a secagem do lodo (kcal/h)

q_1 = conteúdo de calor na mistura gasosa (kcal/h)

Q_2 = quantidade de calor necessária para a evaporação (calor latente) (kcal/h)

q_3 = quantidade de calor necessária para o aquecimento (kcal/h)

q_4 = quantidade de calor perdida para o ambiente (kcal/h)

$$q_t = q_1 + Q_2 + q_3 + q_4$$

$$q_t = 9.800 + 270.000 + 3.850 + 18.360$$

$$q_t = 302.010 \text{ Kcal/h}$$

CENÁRIO 2**Calor necessário para o aquecimento do lodo na 1ª fase:**

Equação 04	$q_1 = \dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot \Delta T_1$
<p>onde</p> <p>q_1 = quantidade de calor necessária para o aquecimento do lodo (kcal/h)</p> <p>\dot{m}_1 = vazão mássica do ar na saída do sistema (kg/h) = 166,4 kg/h = 166.400g/h</p> <p>c_{p1} = calor específico do gás na corrente de exaustão = 1,022 (kcal/kg.°C) = 0,245 (cal/g°C)</p> <p>ΔT_1 = diferença entre a temperatura inicial e final do lodo (°C) = 100 °C – 20 °C = 80 °C</p>	
$q_1 = \dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot \Delta T_1$ $q_1 = 166400 \cdot 0,245 \cdot 80$ $q_1 = 3.261,44 \text{ kcal/h}$	

Calor necessário para a evaporação do lodo na 2ª fase:

Equação 05	$Q_2 = m \cdot L$
<p>onde</p> <p>Q_2 = quantidade de calor necessária para a evaporação (calor latente) (kcal/h)</p> <p>m = quantidade de água a ser evaporada = 166,4 kg/h = 166.400 g/h</p> <p>L = calor latente da água na vaporização = 540 cal/g</p>	
$Q_2 = m \cdot L$ $Q_2 = 166400 \cdot 540$ $Q_2 = 89.856 \text{ Kcal/h}$	

Calor necessário para o aquecimento da massa úmida de lodo:

Equação 06	$q_3 = \dot{m}_3 \cdot c_{p3} \cdot \Delta T_3$
<p>q_3 = quantidade de calor necessária para o aquecimento da massa úmida (kcal/h)</p> <p>\dot{m}_3 = quantidade de massa úmida a ser aquecida (kg/h) = 41,6 kg/h = 41.600 g/h</p> <p>c_{p3} = calor específico do lodo = 0,385 (cal/g°C)</p> <p>ΔT_1 = diferença entre a temperatura inicial e final do lodo (°C) = 100 °C – 20 °C = 80 °C</p>	
$q_3 = \dot{m}_3 \cdot c_{p3} \cdot \Delta T_3$ $q_3 = 41600 \cdot 0,385 \cdot 80$ $q_3 = 1281,28 \text{ kcal/h}$	

Energia perdida (calor) do secador para o ambiente (dissipação):**Equação 07**

$$q_4 = A \cdot h \cdot \Delta T_4$$

q_4 = quantidade de calor perdida para o ambiente (kcal/h)

A = área do tambor do secador = 26 m²

h = Coeficiente de convecção = 5 Kcal/h m²

ΔT_4 = diferença de temperatura entre a superfície e o interior do secador = 88°C - 20°C

$$q_4 = A \cdot h \cdot \Delta T_4$$

$$q_4 = 26 \cdot 5 \cdot 68$$

$$q_4 = 8.840 \text{ Kcal/h}$$

Quantidade total de energia necessária para a secagem do lodo para o cenário 2:

Equação 08

$$q_t = q_1 + Q_2 + q_3 + q_4$$

Onde

q_t = quantidade total necessária para a secagem do lodo (kcal/h)

q_1 = conteúdo de calor na mistura gasosa (kcal/h)

Q_2 = quantidade de calor necessária para a evaporação (calor latente) (kcal/h)

q_3 = quantidade de calor necessária para o aquecimento (kcal/h)

q_4 = quantidade de calor perdida para o ambiente (kcal/h)

$$q_t = q_1 + Q_2 + q_3 + q_4$$

$$q_t = 3.261,44 + 89.856 + 1.281,28 + 8.840$$

$$q_t = 103.238,72 \text{ Kcal/h}$$

CÁLCULOS REFERENTES AO ITEM 4.5**C) Quantidade de calor disponível no aquecedor de fluido térmico para aproveitamento com a finalidade de secagem do lodo****Equação 09**

$$q_5 = \dot{m}_5 \cdot c_{p1} \cdot \Delta T_5$$

onde

q_5 = quantidade de calor residual disponível na chaminé (kcal/h)

\dot{m}_5 = vazão mássica do ar considerando a temperatura e o volume do ar na chaminé = 13.138 kg/h

c_{p1} = calor específico do gás na corrente de exaustão = 1,022 (kcal/kg.°C) = 0,245 (cal/g.°C)

ΔT_5 = diferença entre a temperatura de entrada no secador e a temperatura de saída do secador (°C) = 208 °C - 100 °C = 108 °C

$$q_5 = \dot{m}_5 \cdot c_{p1} \cdot \Delta T_5$$

$$q_5 = 13138 \cdot 0,245 \cdot 108$$

$$q_5 = 347.631 \text{ kcal/h}$$