

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL

GABRIELA ARRUDA VASCONCELOS

SECAGEM DE LODO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA TÊXTIL UTILIZANDO
LEITO DE SECAGEM ACOPLADO A TROCADOR DE CALOR SOLAR

RECIFE

2020

GABRIELA ARRUDA VASCONCELOS

SECAGEM DE LODO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA TÊXTIL UTILIZANDO
LEITO DE SECAGEM ACOPLADO A TROCADOR DE CALOR SOLAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Vinícius Dantas de Araújo

Coorientador: Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda

RECIFE

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- V331s Vasconcelos, Gabriela Arruda
SECAGEM DE LODO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA TÊXTIL UTILIZANDO LEITO DE SECAGEM
ACOPLADO A TROCADOR DE CALOR SOLAR / Gabriela Arruda Vasconcelos. - 2020.
73 f. : il.
- Orientador: Vinicius Dantas de Araujo.
Coorientador: Romildo Morant de Holanda.
Inclui referências.
- Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental, Recife, 2020.
1. Beneficiamento têxtil. 2. Secagem. 3. Lodo. 4. Trocador de calor. I. Araujo, Vinicius Dantas de, orient.
II. Holanda, Romildo Morant de, coorient. III. Título

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL

SECAGEM DE LODO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA TÊXTIL
UTILIZANDO LEITO DE SECAGEM ACOPLADO A TROCADOR DE CALOR
SOLAR

Gabriela Arruda Vasconcelos

APROVADO EM: 31 de Janeiro de 2020

Prof. Dr. Nilson Sant'Anna Junior – UACSA/UFRPE
Membro Externo

Prof. Dr. Alex Souza Moraes – UFRPE
Membro Interno - PPEAMB

Prof. Dr. Vinícius Dantas de Araújo – UFRPE
Orientador - PPEAMB

Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda – UFRPE
Coorientador - PPEAMB

Aos meus pais, por todo apoio e incentivo, meus maiores exemplos de força e perseverança!

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me protegido e guiado meus caminhos durante toda a jornada.

Aos meus pais, Silvana Arruda e José Carlos Vasconcelos, por todo apoio, compreensão e dedicação em todos os momentos da minha vida.

À minha irmã, Giovana Arruda, pela parceria e dedicação de sempre não importando o que aconteça.

À Diego Henrique de Moura, meu namorado, pelo companheirismo, compreensão, apoio e incentivo em todos os meus projetos e momentos.

À toda minha família, Arrudas e Vasconcelos, pelas orações e força durante toda a caminhada.

Às minhas amigas que o mestrado me deu: Géssica Marinho, Ana Luiza Xavier, Maria Carolina Silva, Symone Falcão e Mirella Vianna. Pelo companheirismo e apoio em todos os momentos. Além dos nossos momentos de distração durante toda a jornada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Vinícius Dantas, pelos ensinamentos passados e conhecimentos compartilhados. Assim como ao meu co-orientador, Prof. Dr. Romildo Morant, por todo aprendizado ao longo da jornada no mestrado e também na graduação.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, pela oportunidade de crescimento acadêmico e pessoal. Assim como a todos meus colegas de pós-graduação, funcionários do programa, e aos membros do grupo de pesquisa CITAR.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, por ser mais uma vez minha casa, totalizando um ciclo de 10 anos de aprendizado, crescimento e amadurecimento.

À todos os meus amigos que acompanharam essa fase comigo, dando suporte, força e incentivo. Em especial às Delicadas e Orlânia Crys, pelas ajudas e abrigo nos momentos necessários.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia – FACEPE, pelo recurso financeiro para o desenvolvimento dessa dissertação.

À empresa de lavanderia onde foi realizado o experimento, o Sr. Laércio, José Carlos e Henrique, pelas portas abertas e total apoio ao experimento.

RESUMO

O setor têxtil emprega cerca de 1,7 milhões de pessoas de forma direta e 4 milhões se for somada as pessoas empregadas de forma indireta no Brasil. Atrelado a esse setor, têm-se as indústrias de beneficiamento têxtil. As lavanderias de jeans estão entre as atividades industriais de prioridade ambiental devido ao seu potencial poluidor e complexidade química dos efluentes gerados. As lavanderias e tinturarias industriais geram efluentes líquidos que, após tratamento por decantação da matéria em suspensão, produzem lodo. Esse resíduo tem composição química variada em virtude dos produtos usados no processo. A secagem eficiente do lodo residual se faz necessária mirando os seguintes aspectos: redução dos custos de transporte e destino final do lodo; melhoria nas condições de manejo, já que o lodo desaguado é mais facilmente transportado; aumento do poder calorífico do lodo, através da redução da umidade com vistas à preparação para a incineração; redução do volume para disposição em aterro sanitário ou reuso na agricultura; e diminuição da produção de lixiviados quando da sua disposição em aterros sanitários. Nesse contexto, o trabalho teve a finalidade de avaliar o uso de um trocador de calor solar de baixo custo em conjunto com o sistema de leito de secagem já existente em uma indústria de beneficiamento têxtil, inserida no APL de Confecções do Agreste, a fim de melhorar a eficiência do processo de secagem do lodo residual obtido no processo de tratamento de efluentes desta indústria. Foi verificada a redução do tempo de secagem do lodo de 20 dias para aproximadamente 16 dias com o auxílio do trocador de calor. Além da redução da umidade, reduzindo em aproximadamente 12% o teor de umidade no momento de envio do lodo para o aterro sanitário. Sendo economicamente viável a montagem e instalação do sistema já que o volume de lodo a ser transportado no momento do descarte será maior, devido à redução da presença de água no resíduo.

Palavras-chave: beneficiamento têxtil, secagem, lodo, trocador de calor.

ABSTRACT

The textile sector employs about 1.7 million people directly and 4 million if added indirectly in Brazil. Linked to this sector are the textile processing industries. Jeans laundries are among the environmental priority industrial activities due to their polluting potential and chemical complexity of the generated effluents. Industrial laundries and dry cleaners generate liquid effluents that, after decantation of the suspended matter, produce sludge. This residue has a varied chemical composition due to the products used in the process. The efficient drying of the residual sludge is necessary considering the following aspects: reduction of transportation costs and final destination of the sludge; improved handling conditions, as dewatered sludge is more easily transported; increasing the calorific value of sludge by reducing moisture for incineration preparation; volume reduction for landfill disposal or reuse in agriculture; and decreased leachate production when disposed of in landfills. In this context, the work aimed to evaluate the use of a low cost solar heat exchanger in conjunction with the drying bed system already existing in a textile processing industry, inserted in the Agreste Confections APL, in order to improve the efficiency of the residual sludge drying process obtained in the wastewater treatment process of this industry. The sludge drying time was reduced from 20 days to approximately 16 days with the aid of the heat exchanger. In addition to reducing moisture, reducing by approximately 12% the moisture content at the time of sending sludge to the landfill. It is economically feasible to assemble and install the system since the volume of sludge to be transported at the time of disposal will be higher due to the reduced presence of water in the waste.

Keywords: textile processing, drying, sludge, heat exchanger.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - APL de confecções do agreste pernambucano | 18 |
| Figura 2 - Processo geral das atividades de uma lavanderia | 19 |
| Figura 3 - Escoamento de corrente paralela. | 29 |
| Figura 4 - Escoamento de corrente cruzada. | 30 |
| Figura 5 - Escoamento de correntes cruzadas..... | 30 |
| Figura 6 - Trocador de calor tubo duplo. | 31 |
| Figura 7 - Trocador do tipo carcaça e tubo. | 31 |
| Figura 8 - Trocador do tipo serpentina. | 32 |
| Figura 9 - Trocador de calor tipo placa..... | 33 |
| Figura 10 - Torre de resfriamento..... | 34 |
| Figura 11 - Trocador de contato indireto – transferência direta..... | 35 |
| Figura 12 - Trocador de contato indireto. | 36 |
| Figura 13 - Localização do município de Caruaru. | 37 |
| Figura 14 - Protótipos de leito de secagem com trocador de calor e sem trocador de calor. | 39 |
| Figura 15 - Sistema de funcionamento do protótipo “com trocador” | 40 |
| Figura 16 - Trocador de calor solar de baixo custo. | 41 |
| Figura 17 - Efluente no leito de secagem (início do processo de secagem). ... | 42 |
| Figura 18 - Lodo no leito de secagem (final do processo de secagem). | 43 |

| | |
|--|----|
| Figura 19 - Lodo estocado para destinação final..... | 44 |
| Figura 20 - Pontos de medição da temperatura do lodo. | 45 |
| Figura 21 - Medição de profundidade..... | 45 |
| Figura 22 - Medição da temperatura com termômetro tipo espeto..... | 46 |
| Figura 23 - Termômetro infravermelho..... | 47 |
| Figura 24 - Pontos de medições da temperatura da água no aquecedor solar. | 47 |
| Figura 25 - Potes de coleta de amostras identificados com o ponto coletado.. | 48 |
| Figura 26 - Amostras preparadas para a estufa..... | 49 |
| Figura 27 - Amostras na estufa a 105°C. | 50 |
| Figura 28 - Lodo proveniente do leito “ST” (lado esquerdo), lodo proveniente do leito “CT” (lado direito)..... | 52 |
| Figura 29 - Sistema de leito de secagem da lavanderia onde foi realizado o experimento..... | 54 |
| Figura 30 - Sistema de leito de secagem modificado com trocador de calor solar acoplado..... | 55 |
| Figura 31 - Dia de descarte, primeiro dia de medição..... | 56 |
| Figura 32 - Início da segunda semana de medições..... | 56 |
| Figura 33 - Final das medições. | 56 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 - Médias da porcentagem de umidade presente nas amostras. | 53 |
| Gráfico 2 - Dados de profundidade do descarte 1..... | 58 |
| Gráfico 3 - Dados de profundidade do descarte 2..... | 58 |
| Gráfico 4 - Dados de profundidade do descarte 3..... | 60 |
| Gráfico 5 - Dados de profundidade do descarte 4..... | 61 |
| Gráfico 6 - Dados de profundidade do descarte 5..... | 61 |
| Gráfico 7 - Dados de profundidade do descarte 6..... | 62 |
| Gráfico 8 - Dados de profundidade do descarte 7..... | 63 |
| Gráfico 9 - Diferenças de temperatura do lodo..... | 64 |
| Gráfico 10 - Dados de temperatura do trocador de calor. | 65 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 - Possíveis Impactos derivados do processo geral das atividades de uma lavanderia têxtil de jeans. | 22 |
| Quadro 2 - Principais tecnologias de desidratação | 25 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Resultados do ensaio de umidade “CT” e “ST”..... | 51 |
|---|----|

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA..... | 17 |
| 2.1 | Arranjo produtivo local têxtil | 17 |
| 2.2 | Resíduos e impactos gerados pela lavanderia de jeans | 19 |
| 2.3 | Leis ambientais aplicadas | 22 |
| 2.4 | Secagem do lodo | 25 |
| 2.5 | Trocadores de calor..... | 28 |
| 3 | OBJETIVOS..... | 36 |
| 3.1 | Geral..... | 36 |
| 3.2 | Específicos | 36 |
| 4 | METODOLOGIA | 37 |
| 4.1 | Área de estudo | 37 |
| 4.2 | Experimento | 39 |
| 4.3 | Classificação do lodo..... | 41 |
| 4.4 | Medições, coletas e ensaios | 44 |
| 4.4.1 | Medições | 44 |
| 4.4.2 | Coletas | 48 |
| 4.4.3 | Ensaio..... | 48 |

| | | |
|-----|---|----|
| 4.5 | Eficiência de secagem do lodo | 50 |
| 4.6 | Viabilidade econômica e ambiental | 51 |
| 5 | RESULTADOS..... | 51 |
| 5.1 | Caracterização e destinação do lodo | 51 |
| 5.2 | Sistema de Secagem | 54 |
| 5.3 | Eficiência energética do leito de secagem acoplado ao trocador de calor solar | 57 |
| 5.4 | Viabilidade econômica e ambiental | 65 |
| 6 | CONCLUSÃO | 68 |
| | REFERÊNCIAS | 69 |

1 INTRODUÇÃO

O setor têxtil emprega cerca de 1,7 milhões de pessoas de forma direta e 4 milhões se for somada as pessoas empregadas de forma indireta no Brasil, e tem a quarta maior folha de pagamento das indústrias de transformação no país (ABIT, 2018). Silva et al. (2012) destacam que as indústrias de confecção e têxtil tem atingido um desenvolvimento e expansão, principalmente no Agreste Pernambucano, se caracterizando como a principal atividade industrial da Mesorregião.

Atrelado a esse setor, têm-se as indústrias de beneficiamento têxtil, as quais são as lavanderias industriais, isto é, as lavanderias de jeans. A disseminação dessas lavanderias no Agreste Pernambucano mudou a economia local. Citando a cidade de Toritama como exemplo, Almeida (2013) relata que a cidade despontou na década de 1970, antes cidade com grandes concentrações de fábrica de calçados, iniciou a sua vocação atual de capital do jeans com a introdução das lavanderias, pois não necessitavam mais levar as roupas para o Recife para realizar a lavagem.

Segundo Hasanbeigi; Price (2012), essas indústrias são classificadas como heterogêneas, de pequeno e médio porte, com grande variação de processos e equipamentos que podem utilizar diferentes matrizes energéticas. Estas matrizes energéticas podem divergir bastante, como: madeira de reflorestamento, restos de madeiras de construção ou da indústria moveleira, óleo combustível, gás natural e eletricidade. Sendo a metade do gasto energético com a caldeira para aumentar a temperatura da água para utilização na linha de produção. Acerca disso, Silva et al., 2012 destaca que “a poluição resultante do setor de lavanderias, assim como a poluição gerada por outros setores industriais, é avaliada como uma externalidade negativa para sociedade, na medida em que, como dito anteriormente, gera uma alteração no padrão de vida da comunidade local”.

As lavanderias de jeans estão entre as atividades industriais de prioridade ambiental devido ao seu potencial poluidor e complexidade química dos efluentes gerados (CETESB, 2013). Segundo Amaral e Silva, et al., (2011) o setor industrial de lavanderias está propício a degradação ambiental pois emite poluentes gasosos, possui potencial de alterar os cursos de água e modificar ecossistemas de pequenas áreas. Mucelin e Berllini (2008), afirmam que as alterações ambientais, com o passar do tempo, modificam a paisagem e comprometem a proteção dos ecossistemas. Os compostos químicos presentes nos efluentes dessas lavanderias têm agravado a poluição hídrica causada no Rio Ipojuca, por exemplo.

As lavanderias e tinturarias industriais geram efluentes líquidos que, após tratamento por decantação da matéria em suspensão, produzem lodo. Esse resíduo tem composição química variada em virtude dos produtos usados no processo. Tal resíduo é considerado inadequado para a disposição, *in natura*, no meio ambiente, devendo ter como destinação final um aterro industrial (PIETROBON, 2002).

A geração e disposição de lodos têxteis constitui um problema de dimensões consideráveis, não só para as indústrias, como para toda a sociedade, tendo em vista que o volume a ser disposto em aterros industriais é muito elevado e o custo do transporte, para as empresas, será em função do peso do lodo a ser transportado. Sendo assim, a secagem eficiente do lodo residual se faz necessária mirando os seguintes aspectos: redução dos custos de transporte e destino final do lodo; melhoria nas condições de manejo, já que o lodo desaguado é mais facilmente transportado; aumento do poder calorífico do lodo, através da redução da umidade com vistas à preparação para a incineração; redução do volume para disposição em aterro sanitário ou reuso na agricultura; e diminuição da produção de lixiviados quando da sua disposição em aterros sanitários (CURI, 2007).

Nesse contexto, o projeto teve a finalidade de avaliar o uso de um trocador de calor solar de baixo custo em conjunto com o sistema de leito de secagem já

existente em uma indústria de beneficiamento têxtil, inserida no APL de Confecções do Agreste, com o objetivo de melhorar a eficiência do processo de secagem do lodo residual obtido no final do processo de tratamento de efluentes desta indústria, diminuindo a umidade presente para a realização do descarte.

O método utilizado para a realização da pesquisa foi o método experimental, que consiste basicamente em submeter os objetos de estudo à influência de variáveis, onde há o controle e o conhecimento do que está sendo executado e analisado pelo investigador, observando os resultados que as diferentes condições produzem no objeto (GIL, 2008).

Paralelo ao experimento foram realizadas pesquisas de revisão bibliográfica para que fossem reunidas informações atuais sobre o assunto, de modo a tornar o resultado final o mais completo possível. Além de entrevistas com funcionários da lavanderia com o intuito de obter informações relevantes para o andamento e conclusão da pesquisa.

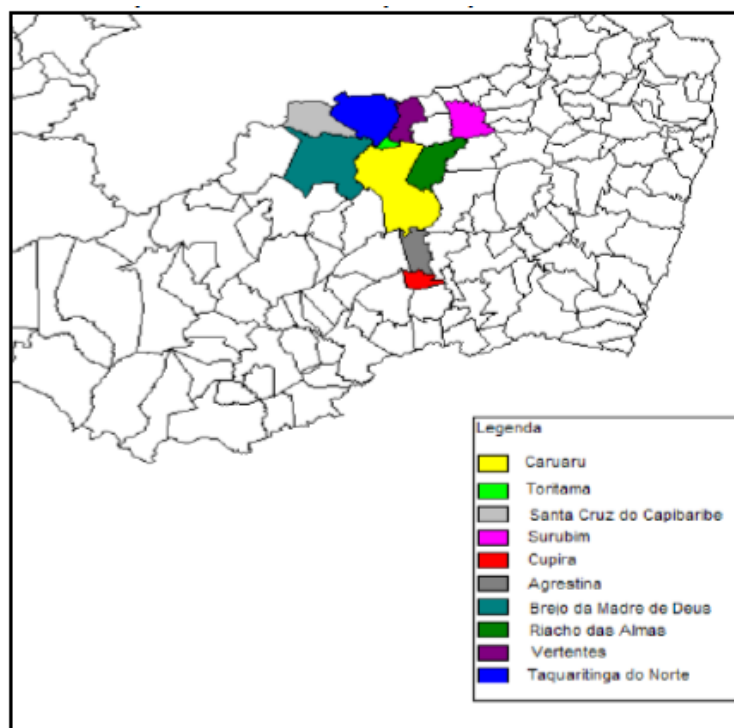
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Arranjo produtivo local têxtil

De acordo com o Ministério da Economia, Indústria, Comércio Exterior e Serviços - MDIC (2018), os Arranjos Produtivos Locais (APLs) são definidos como: aglomerações de empresas e empreendimentos (localizados em um mesmo território) que apresentam especialização produtiva, algum tipo de governança e mantêm vínculos de articulação, interação, cooperação e aprendizagem entre si. Tendo também este tipo de relação com outros atores locais, tais como: governo, associações empresariais, instituições de crédito, ensino e pesquisa. Dando destaque ao principal objetivo, que é dinamizar as estruturas empresariais gerando renda e emprego.

De acordo com os dados do Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE) (2013), o polo de confecções do estado de Pernambuco é composto por 18.803 unidades produtivas, que estão inseridas nas dez cidades do agreste do Estado e compõem o APL, são elas: Agrestina, Brejo da Madre de Deus, Caruaru, Cupira, Riacho das Almas, Santa Cruz do Capibaribe, Surubim, Taquaritinga do Norte, Toritama e Vertentes (Figura 1). Devem ser destacadas, especialmente, as cidades de Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe e Toritama, pois concentram o maior número de unidades produtivas, formando o núcleo original do polo e englobando 77% do total das produções para os dez municípios.

Figura 1 - APL de confecções do agreste pernambucano



Fonte: Sebrae (2013)

O estado de Pernambuco é o segundo maior polo têxtil do Brasil, de acordo com o Sebrae (2013), empregando cerca de 100 mil pessoas na região do agreste, esse número expressa aproximadamente 20% da população em idade ativa na região. Além disso, nos dez municípios, 80% das unidades produtoras são consideradas informais (SEBRAE, 2013), tendo o restante

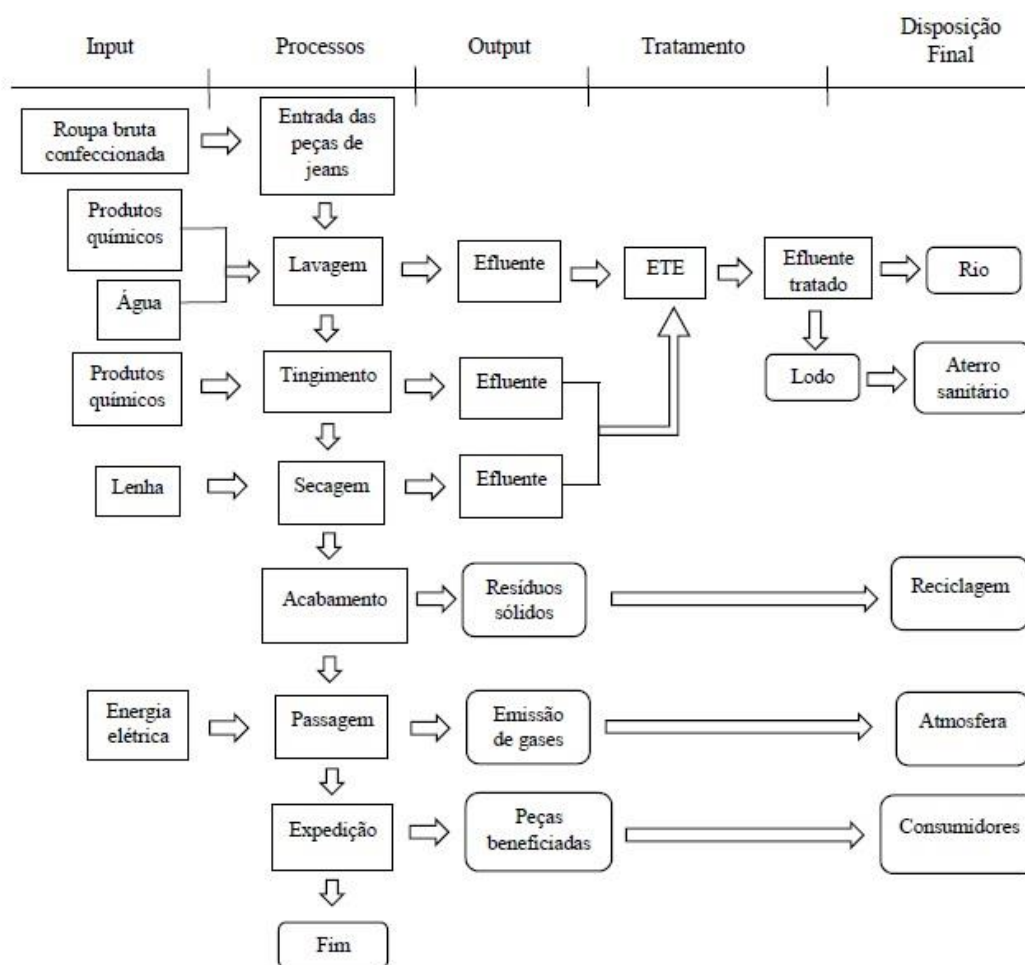
declarado possuir o Cadastro Nacional de Pessoa Jurídica do Ministério da Fazenda. Sendo este dado importante devido ao tratamento fiscal dado ao setor para combater a informalidade, com o auxílio de leis e decretos federais e estaduais.

O beneficiamento de peças de *jeans*, nas lavanderias localizadas em sua maioria no município de Caruaru, é uma das principais atividades econômicas do APL têxtil pernambucano. Estas lavanderias sofrem diretamente a influência das tendências da moda, fazendo com que essas indústrias tenham uma forte interação para atuar em um cenário dinâmico (SEBRAE, 2013; BRITO, 2013).

2.2 Resíduos e impactos gerados pela lavanderia de jeans

O processamento de uma lavanderia de jeans, geralmente, é dividido em cinco fases, sendo estas *input*, processos, *output*, tratamento e destinação final (Figura 2). Na fase de *input* têm-se a adição ao processo de componentes essenciais para que as etapas ocorram corretamente, entre estes estão a roupa bruta confeccionada, os produtos químicos e a água. Entre os processos têm-se todos os passos existentes numa lavanderia para que a produção tenha um resultado satisfatório, entre eles estão a lavagem, o tingimento, a secagem, o acabamento e a passagem. No *output* são destacados o que resta após os processos, podendo ser destacados os efluentes gerados, os resíduos sólidos, os gases emitidos e as peças beneficiadas (SILVA FILHO, 2013).

Figura 2 - Processo geral das atividades de uma lavanderia



Fonte: Adaptado de Silva Filho (2013)

Dentre os *outputs* estão os produtos, resíduos e rejeitos. Os produtos podem gerar impactos quando da logística, a depender do modal adotado e da energia utilizada por este. Os rejeitos gasosos devem passar por filtros, para serem lançados na atmosfera (ROSE et al. 2012). Já para os efluentes líquidos, há diversos tratamentos. Costa et al. (2018) assinalam a possibilidade do uso de tratamento biológico, sendo que resulta em alta turbidez, que pode ser reduzida pela decantação do material biológico antes de lançar o efluente na superfície do corpo hídrico receptor ou pela imobilização da biomassa orgânica em um suporte. Estes rejeitos líquidos são direcionados para estações de tratamento de efluentes (ETE), onde passam por procedimentos para elevar a adequação ambiental. É importante destacar que algumas lavanderias possuem alternativas

de tratamento e outros já direcionam estes rejeitos para a destinação final. Todos esses processos são passíveis de geração de impactos (SILVA FILHO, 2013).

Em geral, os impactos nas lavanderias de jeans são causados pela não utilização da estação de tratamento de água, pelo desperdício e contaminação da mesma e pela geração de lixo sólido (fibras de tecido, cinza, resto de pedras e lodo). Observa-se a importância de ressaltar que a emissão de resíduos é um agravante dos impactos, na água, no ar e no solo, entre estes, é possível encontrar fibras dos tecidos suspensos no ar e na água de lavagem, resto de pedras expandidas, água contaminada com produtos químicos, vapores e névoas dos produtos químicos, fumaça emitida pela caldeira, calor emitido durante o processo, cinzas das caldeiras, ruído das máquinas e lodo gerado após o tratamento do efluente. Esse resíduo, o lodo, tem composição química variada em virtude dos produtos usados no processo e é considerado inadequado para a disposição, *in natura*, no meio ambiente, devendo ter como destinação final um aterro industrial (PIETROBON, 2002).

Este lodo geralmente possui em sua composição metais pesados e outros componentes químicos, entre eles estão fósforo, cálcio, sódio, ferro, manganês, alumínio, silício, carbono total, carbono orgânico e cloretos (SOUTO, 2017). Sendo a poluição por metal pesado muito perigosa devido à sua toxicidade e à sua persistência no ambiente, já que geralmente não são degradados ou desintoxicados de maneira fácil.

Estudando os metais pesados da lixívia industrial da lavagem de lodo após a lavagem fortemente suja de uniformes industriais, processo similar ao das lavanderias em tela, Mymrin et al. (2018) afirmam que o aspecto mais relevante da pesquisa foi identificar o uso de resíduos industriais perigosos como matéria-prima para a consequente redução do impacto ambiental causado pela eliminação indiscriminada desses resíduos e, assim, diminuir a extração de recursos naturais para a produção de materiais cerâmicos.

Seguindo esta linha de pesquisa, Castro et al. (2015) analisam o uso do lodo, proveniente de lavanderias têxteis, incorporado na fabricação de blocos

cerâmicos acústicos com o objetivo de diminuir o ruído causado pelo tráfico de veículos nas metrópoles brasileiras. Com esses estudos é possível compreender que existem inúmeras alternativas para a minimização dos impactos ambientais e também a minimização da geração de resíduos (Quadro 1) causados pelas atividades das lavanderias têxteis de jeans.

Quadro 1 - Possíveis Impactos derivados do processo geral das atividades de uma lavanderia têxtil de jeans.

| NO MEIO AMBIENTE | NA EMPRESA | NA SAÚDE DO HOMEM | DO SÓCIOECONÔMICOS |
|---|---|---|---------------------|
| Geração de efluentes contaminados nas águas de superfície e sub-superfície | Desperdício de produtos químicos | Riscos ergonômicos | Geração de renda |
| Contaminação atmosférica resultante de queima de lenha na caldeira | Desperdício de água | Inalação de fibras de tecido | Geração de riqueza |
| Geração de lixo (fibras de tecido, resíduos das pedras e cinza da caldeira) | Custo de produção alto | Exposição ao ruído das máquinas | Geração de empregos |
| Geração de resíduos sólidos (lodo) | Perda de oportunidades para exportação | Umidade excessiva | |
| | Falta de condições para obter financiamento | Dermatoses ocupacionais | |
| | | Intoxicação por inalação de vapores e contato dermal com os produtos químicos | |

Fonte: Adaptado de Silva Filho (2013)

2.3 Leis ambientais aplicadas

No Brasil, há um conjunto de políticas públicas focadas na conservação e na preservação ambientais. Em relação ao uso racional dos recursos naturais, observa-se a existência de normativas que regulamentam bens que outrora eram de livre acesso. É destaque a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH), Lei n. 9.433 de 8 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), onde, no Art. 1º, trata que a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo destes. Observando a Lei n. 9.605 de fevereiro de 1998, que dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente (BRASIL, 1998), o Art. 6º trata da imposição e gradação da penalidade que será aplicada em caso de crime ambiental.

Outro destaque é a Lei n. 1.413 de 14 de agosto de 1975, que dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais, regulamentando no Art. 1º a prevenção ou a remediação da poluição e da contaminação do meio ambiente (BRASIL, 1975). Quanto aos resíduos sólidos, a gestão é norteadada pelas diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei n. 12.305 de 2 de agosto de 2010, que determina no Art.7º, como um dos objetivos, a pirâmide de prioridades, a partir da não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento de resíduos, antes da disposição final da parcela considerada como rejeito (BRASIL, 2010).

Os impactos ambientais quanto ao processo de beneficiamento de jeans são considerados um fator negativo do Arranjo Produtivo Local (APL) (SILVA et al., 2005). Desta forma, a Resolução Conama n. 1, de 23 de janeiro de 1986, que dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental, no Art. 1º, considera como impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas (CONAMA, 1986). Já a Resolução Conama n. 237, de 19 de dezembro de 1997, no Art. 1º, dispõe sobre as definições de licenciamento ambiental, licença ambiental, estudos ambientais e impacto regional ambiental (CONAMA, 1997), essenciais para o funcionamento de empreendimentos que denotem alterações nos parâmetros ambientais de forma significativa. A Resolução Conama n. 20, de 18 de junho de 1986, no Art. 1º, estabelece a classificação das águas doces, salobras e salinas do Território Nacional (CONAMA, 1986). Já a Resolução Conama n. 357, de 17 de março de 2005, no Art. 1º, dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências (CONAMA, 2005). Todas essas Resoluções são relevantes face determinarem parâmetros norteadores para a elevação da sustentabilidade em empreendimentos com potencial impactante.

A Lei Orgânica do município de Caruaru, no Art. 5º, estabelece que o poder municipal tem por competência legislar sobre assuntos de interesses

locais, elaborar Plano Diretor, promover o adequado ordenamento territorial, mediante planejamento e controle do uso, do parcelamento e da ocupação do solo urbano, sendo essas atribuições vinculadas diretamente à instalação de empreendimentos no local (CARUARU, 2014). A Lei Municipal n. 5.058, de 25 de novembro de 2010, dispõe sobre o licenciamento, as infrações e as fiscalizações ambientais no município de Caruaru (CARUARU, 2010). Esta apresenta, no Art. 9º, as etapas do procedimento de licenciamento ambiental. Já a Lei complementar n. 041, de 20 de dezembro de 2013, no Art. 1º, apresenta os coeficientes de utilização definidos para as áreas do município, dispondo dos usos e dos parâmetros do local, delimitando as zonas de preservação ambiental (CARUARU, 2013). Este *lexus* municipal é fundamental para que os empreendimentos estejam ambientalmente adequados.

Para além da legislação, o estímulo da elevação da qualidade da gestão e manutenção do meio ambiente devem ser um norte, apesar da observação de Brasil et al. (2016) de que deve haver um esforço no sentido de delinear leis que ajudem a implantação de inovações, apesar destas serem raras, caras e difíceis de serem adaptadas a uma realidade local, apesar de terem potencial positivo no negócio e no processo gerencial. Neste sentido, observa-se que há necessidade de se estabelecer bases mais sustentáveis para a gestão no setor têxtil, com foco na implementação de processos e no desenvolvimento de produtos ecoeficientes, além de encorajar o consumo sustentável como valor na sociedade. Ressaltando que o setor têxtil brasileiro necessita absorver tecnologias sustentáveis, realizar o desenvolvimento de novos materiais e processos produtivos, reduzindo o uso de recursos naturais e diminuindo o potencial poluidor setorial. Certamente tal desenho se dará com mais facilidade à medida que as políticas públicas incentivem tais mudanças por meio de Instrumentos Econômicos.

2.4 Secagem do lodo

A secagem do lodo ou desaguamento do lodo (como também pode ser chamado esse processo) tem o objetivo de aumentar a concentração de sólidos reduzindo o percentual de água presente. Este processo é necessário de forma a facilitar a disposição final do resíduo ou até mesmo o seu reuso. De acordo com Hedlund (2016), para qualquer técnica de secagem ou desaguamento é desejável que seja obtido no resultado final um lodo com concentração de SST superior a 200 g/L, ou teor de SST superior a 20% em massa.

A realização da secagem pode ser realizada através de duas formas: mecanizada e não mecanizada (HEDLUND, 2016):

a) Secagem mecanizada

Este tipo de secagem é utilizado em substituição aos meios naturais e alguns dos equipamentos que podem ser utilizados são: prensa desaguadora tipo parafuso, filtros a vácuo, filtros presa de placas, filtros prensa de esteira e centrífugas (CAETANO, 2018; HEDLUND ,2016; PEREIRA, 2011; RICHTER ,2001). No Quadro 2 são relacionadas as principais aplicações e limitações destes principais processos de secagem ou desaguamento.

Quadro 2 - Principais tecnologias de desidratação

| TÉCNICA | APLICAÇÕES | LIMITAÇÕES | CUSTO RELATIVO |
|--------------------|---|--|----------------|
| Prensa desaguadora | Capaz de obter um lodo relativamente seco, com 40-50% de sólidos secos. | Sua eficiência é muito sensível às características da suspensão. As correias podem se deteriorar rapidamente na | Baixo |

| | | | |
|-------------------------|---|--|--------------|
| | | presença de material abrasivo. | |
| Decantação centrífuga | Capaz de obter um lodo desidratado com 15-35% de sólidos. | Não tão efetiva na desidratação como filtração. | Médio |
| | Adequada para áreas com limitação de espaço. | O tambor está sujeito a abrasão | |
| Filtração prensa | Usado para desidratar sedimentos finos. | Necessita aplicação de cinza e cal. | Elevado |
| | Capaz de obter torta com 40-50% de sólidos. | Troca do meio filtrante demorada. | |
| | | Elevado custo operacional e de energia | |
| Filtro rotativo a vácuo | Mais indicado para desidratar sedimentos finos granulares, podendo obter torta de até 35-40%. | É o método menos eficaz de filtração. Elevado consumo de energia. | Mais elevado |

Fonte: Adaptado de Caetano (2018)

b) Secagem não mecanizada

A secagem não mecanizada não utiliza meios mecânicos durante seu processo, apenas agentes naturais como a gravidade e a evaporação. Alguns exemplos deste processo são: leitos de secagem, lagoas de lodo e filtração por geotêxtil (CAETANO, 2018; HEDLUND, 2016).

De acordo com Caetano (2018), os leitos de secagem são constituídos por tanques rasos e o processo de secagem ou desaguamento ocorre por meio de sedimentação, drenagem e evaporação. Tendo como finalidade a retenção do lodo proveniente do adensador com o objetivo de desidrata-lo a partir da incidência solar direta. O rejeito líquido é direcionado para algum corpo receptor e o rejeito sólido destinado para a área de estocagem para posterior descarte correto. Todo o processo de secagem no leito, na fase do enchimento, possui uma duração média de 15 a 30 dias, e para a fase de secagem entre três semanas ou mais.

Segundo a ABNT (2011), o leito de secagem é caracterizado por um tanque retangular que possui uma camada filtrante, podendo ser areia ou brita que viabiliza a drenagem da água. O IBGE (2015) relata que mesmo com o aumento do uso das tecnologias mecanizadas nos últimos anos, ainda existe a tendência de se optar pelo leito de secagem como forma de desaguamento do lodo em estações de tratamento de efluentes, já que o clima do país é favorável para que ocorra a secagem natural.

As lagoas de lodo também podem ser consideradas como boas alternativas para a secagem do lodo porque possuem baixo custo e um sistema de funcionamento bem parecido com o dos leitos de secagem. Sendo seu processo de remoção de água composto por três fases: drenagem, evaporação e transpiração (CAETANO, 2018).

No que diz respeito à secagem ou desaguamento por geotêxtil, neste processo a água passa por microporos de manta de geotêxtil e o excesso de água é drenado, aumentando a concentração de sólidos (HEDLUND, 2016). Segundo Caetano (2018) e Silveira (2012), as mantas geotêxtis são

impermeáveis e são produzidas a partir de polímeros e fibras sintéticas como polipropileno, poliéster, poliamida e polietileno.

No momento da escolha do sistema de secagem mais adequado devem ser levados em consideração os aspectos técnicos e econômicos. Para a seleção do equipamento mais apropriado alguns pontos devem ser ressaltados, como: características do lodo a ser desaguado, características exigidas para o resíduo sólido final, o custo de transporte e a disposição final do resíduo (CAETANO, 2018; PEREIRA, 2011).

2.5 Trocadores de calor

Segundo Gardenal et al (2016), trocadores de calor são equipamentos muito utilizados pelas indústrias em geral e são responsáveis por realizar a troca térmica entre duas substâncias. A diferença de temperatura entre dois meios é a força motriz responsável pela troca de calor, segundo as leis da termodinâmica. Com isso, é possível dizer que estes equipamentos trabalham sempre com dois materiais, geralmente fluidos, em diferentes temperaturas.

Em relação ao funcionamento, os trocadores de calor podem ser divididos em três princípios diferentes: pela mistura de fluidos, com armazenagem direta e com parede que separa os fluidos. No princípio onde ocorre a mistura dos fluidos, dois fluidos de temperaturas diferentes se misturam em um único sistema, alcançando uma mesma temperatura final. Podendo ocorrer em ambiente aberto ou fechado. Já no princípio com armazenagem intermediária, os fluidos quente e frio passam de forma alternada na mesma passagem. No momento que o fluido quente passa pela passagem, a parede e o enchimento do trocador armazenam o calor. Em seguida, o fluido frio atravessa o trocador de calor e absorve o calor armazenado. Sendo este método geralmente utilizado para gases (ÇENGEL & GHAJAR, 2012).

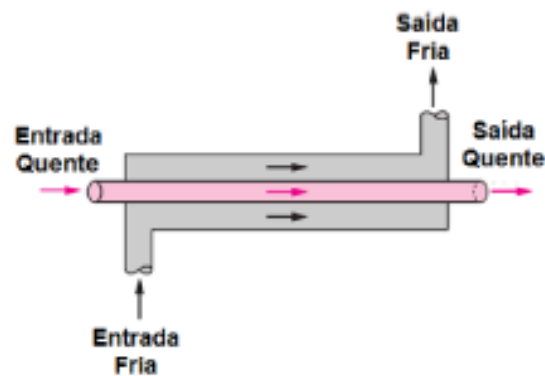
Para o princípio que possui a parede de separação dos fluidos, os mesmos passam pelo trocador sem contato direto, por meio de tubulações distintas, separadas por paredes que possuem alta condutibilidade térmica

(geralmente feitas de metais, como alumínio e cobre ou ligas metálicas). Neste caso, o escoamento pode ocorrer de duas formas. A primeira forma é em correntes paralelas, quando os fluidos entram pelo mesmo lado do trocador e fluem no mesmo sentido, ou quando entram por lados opostos e fluem em sentido contrário. A segunda forma ocorre em correntes cruzadas, quando os fluidos escoam de forma perpendicular. Geralmente, o escoamento em corrente cruzada é aplicado em aquecimento de gases e sistemas de refrigeração (ÇENGEL & GHAJAR, 2012).

Os trocadores de calor podem ser classificados em três tipos: tipo de corrente, tipo de estrutura e natureza da transferência de calor (ÇENGEL & GHAJAR, 2012). Na classificação quanto ao tipo de corrente, podem ser:

- Correntes paralelas: os fluidos frio e quente entram pelo mesmo lado, escoam no mesmo sentido e saem pelo mesmo lado (Figura 3);

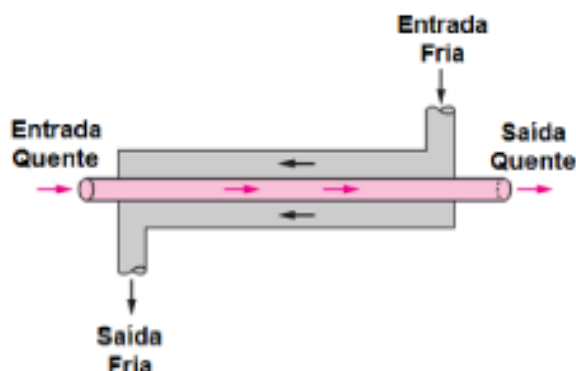
Figura 3 - Escoamento de corrente paralela.



Fonte: Çengel e Ghajar (2012).

- Correntes contrárias / contracorrentes: os fluidos entram por lados opostos, escoam e saem por lados opostos (Figura 4);

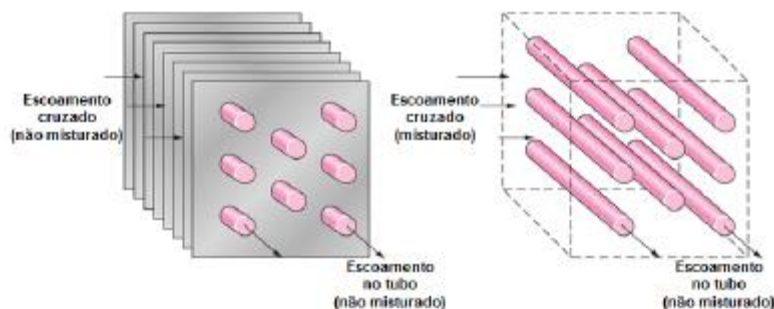
Figura 4 - escoamento de corrente cruzada.



Fonte: Çengel & Ghajar (2012).

- Correntes cruzadas: um fluido escoava de forma perpendicular ao outro. Possuem aletas que não definem se os fluidos se misturam ou não nas duas direções. São chamados de fluido misturado aquele que no layout não possui aletas, permitindo o escoamento em duas direções e o não-misturado é aquele onde são encontradas aletas paralelas que permitem o escoamento em uma única direção (Figura 5).

Figura 5 - Escoamento de correntes cruzadas.



Fonte: Çengel & Ghajar (2012).

Em relação ao tipo de estrutura dos trocadores de calor podem ser classificados em: tubulares e tipo placa. Os trocadores de estrutura tubular geralmente são construídos com tubos circulares e são usados para aplicações de transferência de calor do tipo líquido/líquido (com uma ou duas fases). Também são bem eficientes em transferência de calor gás/gás, tendo destaque para altas pressões e temperaturas operacionais muito elevadas (ÇENGEL & GHAJAR, 2012). Podem ser classificados em:

- Tubo duplo: são considerados o tipo mais comum de trocador de calor. São formados por dois tubos concêntricos, na maioria das vezes retos e com conexões ao seu caminho (Figura 6). Geralmente dispostos em forma de “U”, para que seja permitida a conexão em série entre os trocadores. É considerado de fácil construção e montagem, assim como possui fácil limpeza e manutenção. Geralmente é usado para aplicações em pequenas capacidades.

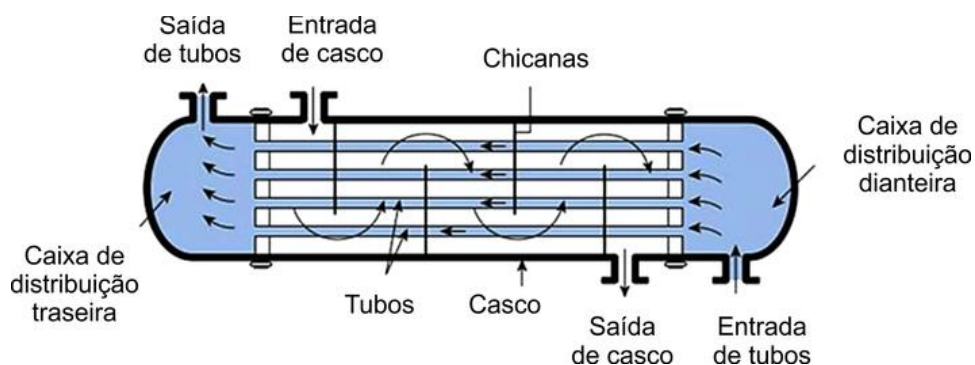
Figura 6 - Trocador de calor tubo duplo.



Fonte: trocadordecalor.com.br (2019).

- Carcaça e tubo: formado por tubos e uma carcaça (Figura 7). Um dos fluidos passa pelo espaço entre a carcaça e os tubos, e o outro por dentro dos tubos. São muito versáteis, podendo ser feitos de vários tipos de materiais e tamanhos. Sendo também usados para qualquer capacidade e condições operacionais, como altas temperaturas e pressões, fluido viscosos e atmosferas altamente corrosivas.

Figura 7 - Trocador do tipo carcaça e tubo.



Fonte: Çengel e Ghajar (2012)

- Serpentina: neste tipo uma ou mais serpentinas são ordenadas em uma carcaça (Figura 8). Um tubo cilíndrico forma a serpentina e por dentro dele escoa o vapor ou o fluido que trocará calor com o fluido que estará dentro da carcaça. Neste tipo de trocador a limpeza é considerada complicada, já que algumas vezes os fluidos de fora da serpentina possuem substâncias que aderem a sua superfície, dificultando a troca de calor entre o fluido e a carcaça. Em contrapartida, possui uma grande superfície de troca térmica e alta eficiência.

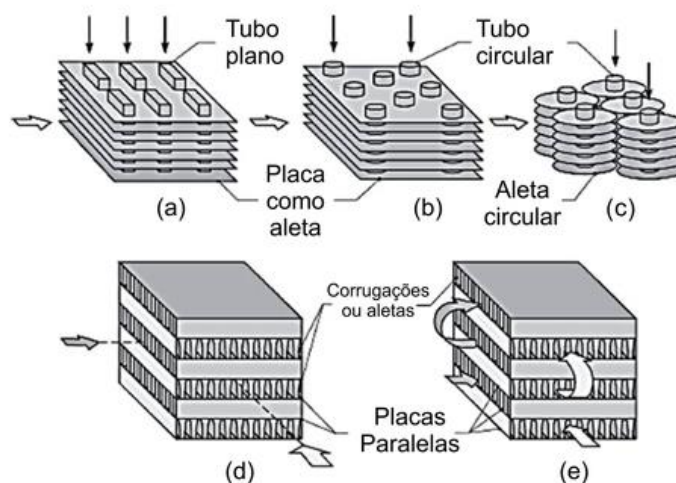
Figura 8 - Trocador do tipo serpentina.



Fonte: trocadordec calor.com.br (2019).

Em relação aos trocadores de calor do tipo placa (Figura 9), estes são formados por uma série de placas de aço inox, separadas por gaxetas de borracha entre cada placa. As placas são dispostas paralelamente uma a outra, de forma alternada, formando canais por onde passaram os fluidos, quente e frio. Onde cada fluido percorre um lado da placa. A disposição das placas em forma de canais proporciona maior velocidade e turbulência, com o objetivo de eliminar áreas de estagnação de líquido, facilitando a transferência de calor (ÇENGEL & GHAJAR, 2012).

Figura 9 - Trocador de calor tipo placa.



Fonte: Incropera et al. (2008).

Os trocadores de calor também podem ser classificados de acordo com a natureza da transferência de calor, podendo ser por contato direto ou contato indireto. Os trocadores de contato direto, ou de mistura, são aqueles onde o fluido de maior temperatura cede calor ao de menor temperatura até que os dois atinjam uma temperatura de equilíbrio. Neste tipo ocorre transferência de massa e por causa disso possuem uma maior taxa de transferência de calor do que os trocadores de contato indireto. Sua construção é relativamente barata, quando comparada ao trocador de contato indireto, embora sua utilização esteja restrita a processos em que possa ocorrer a transferência de massa (ÇENGEL & GHAJAR, 2012). Um bom exemplo são as torres de resfriamento (Figura 10) dos processos de umidificação, onde um líquido escoar pela torre e o ar quente ascende resfriando o ar umidificando-o.

Figura 10 - Torre de resfriamento.

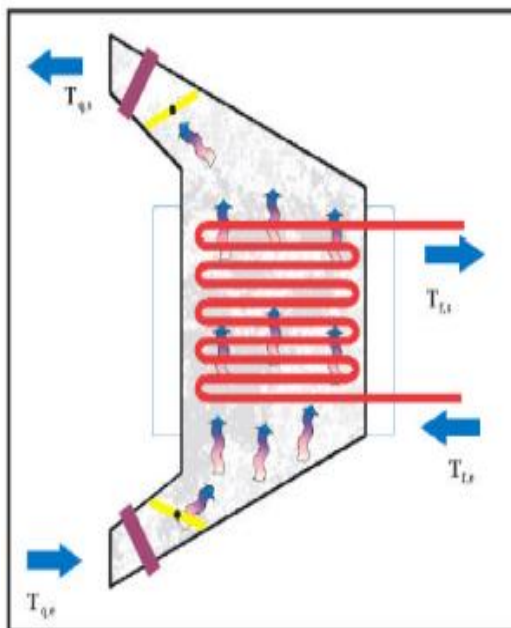


Fonte: premiumambiental.com.br (2019).

O que se refere aos trocadores de calor de contato indireto ou de superfície, são aqueles que os fluidos permanecem separados e o calor é transferido de forma contínua através de uma parede, por onde é realizada a transferência de calor (ÇENGEL & GHAJAR, 2012). Este tipo pode ser classificado em:

- Transferência direta: através de uma parede ocorre o fluxo contínuo de calor do fluido quente ao frio, mas não há mistura entre eles, pois cada um permanece em passagens separadas (Figura 11). Este tipo de trocador também é conhecido como recuperador, e alguns exemplos são: trocadores tipo placa, trocadores tipo tubular e trocadores de superfície estendida.

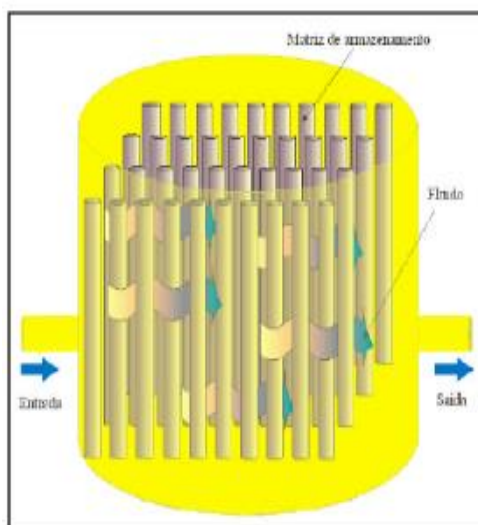
Figura 11 - Trocador de contato indireto – transferência direta.



Fonte: Trocadores de calor, exercícios de engenharia de alimentos (2010).

- Armazenamento: neste tipo, os dois fluidos percorrem de forma alternada as mesmas passagens de troca de calor (Figura 12). Uma estrutura chamada matriz é a superfície de transferência de calor. Este trocador também é chamado de regenerador, já que em seu funcionamento, no caso de aquecimento, o fluido quente atravessa a superfície de transferência de calor e a energia térmica fica armazenada na matriz. Após isso, o fluido frio passa pelo mesmo local e a matriz “libera” a energia térmica anteriormente armazenada.

Figura 12 - Trocador de contato indireto.



Fonte: Trocadores de calor, exercícios de engenharia de alimentos (2010).

3 OBJETIVOS

3.1 Geral

Avaliar o uso de um trocador de calor solar de baixo custo em conjunto com o sistema de leito de secagem já existente nas indústrias de beneficiamento têxtil, inseridas no APL de Confeções do Agreste de Pernambuco.

3.2 Específicos

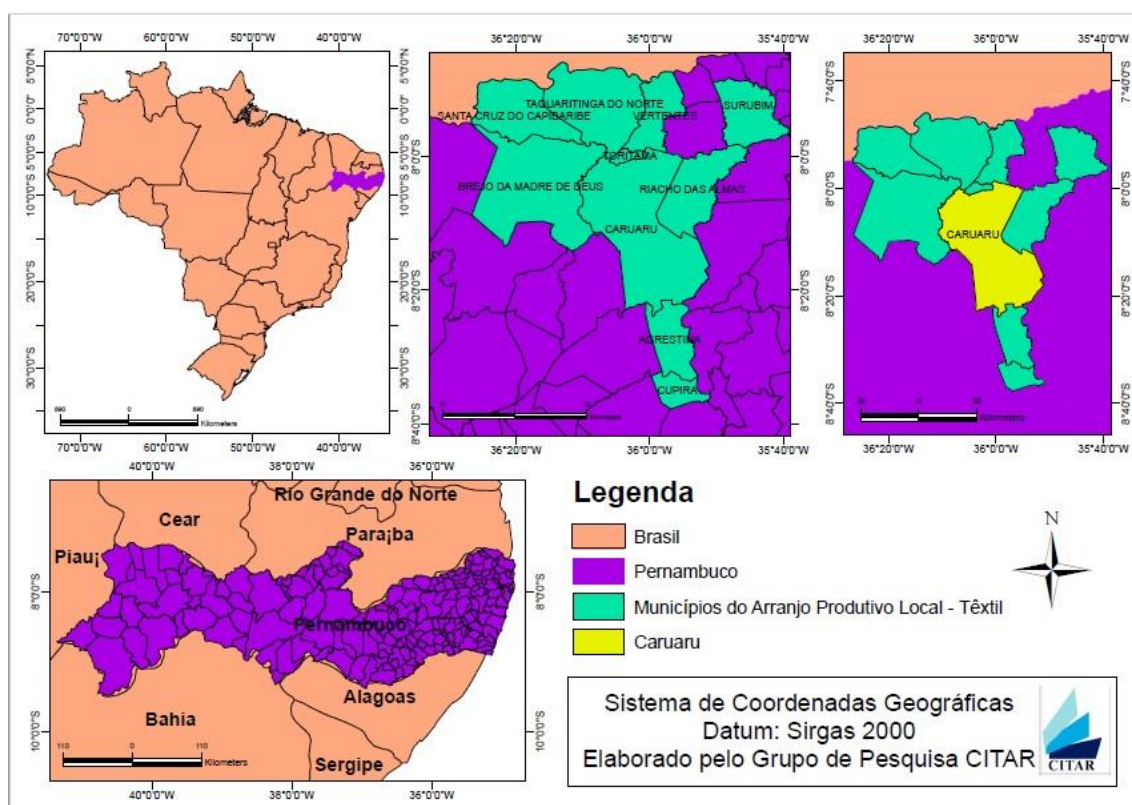
- Identificar o processo de obtenção e destinação/disposição dos resíduos sólidos produzidos pelas lavanderias industriais de jeans;
- Caracterização física referente ao teor de humidade do lodo residual obtido pelo processo tradicional de secagem;
- Montagem de sistema de leito de secagem acoplado com trocador de calor solar e avaliar sua eficiência na secagem do lodo residual;
- Avaliar a viabilidade econômica para adequação dos sistemas atuais a curto e longo prazo.

4 METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

A cidade de Caruaru está localizada a aproximadamente 135 km da capital Recife, no Agreste pernambucano. O município está situado na microrregião do Vale do Ipojuca, tendo como limites ao sul os municípios de Altinho e Agrestina, ao leste estão Bezerros e Riacho das Almas, ao norte encontram-se Toritama, Vertentes, Frei Miguelinho e Taquaritinga do Norte, e a oeste estão Brejo da Madre de Deus e São Caetano (BDE/PE, 2019). Além de estar inserida dentro do APL do estado de Pernambuco (Figura 13).

Figura 13 - Localização do município de Caruaru.



Fonte: CITAR (2019).

A população da cidade, estimada em 2018, foi de aproximadamente 356.872 habitantes e extensão territorial de 920,610 km². Esses dados fazem com que Caruaru seja considerado o quarto município do estado de Pernambuco

em termos de densidade demográfica (IBGE, 2017). A sede do município possui altitude média de 545 metros e coordenadas geográficas de 08°17'S latitude e 35° 58'W de longitude (CPRM, 2005).

De acordo com Alvares et al. (2013), o clima de Caruaru, segundo a classificação de Köppen-Geiger, é do tipo semiárido, com verões quentes e secos, e invernos amenos e chuvosos. O período chuvoso inicia-se em fevereiro, com chuvas de pré-estação e seu término ocorre no final do mês de agosto, podendo prolongar-se até a primeira quinzena de setembro. A chuva constante concentra-se nos meses de maio, junho e julho e os meses mais secos ocorrem entre outubro e dezembro (FRANÇA et al., 2018). Segundo Medeiros (2017), a média anual de precipitação é de 573,8mm.

No que diz respeito às temperaturas médias do município, França et al. (2018) apresenta que as temperaturas oscilaram entre 20,6°C, em julho, a 24,7°C, em novembro, com valor anual médio de 22,9°C.

A cidade de Caruaru foi escolhida para a realização do estudo devido à acessibilidade do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da UFRPE com as empresas do Polo Têxtil do Agreste Pernambucano.

O experimento foi realizado em uma lavanderia de beneficiamento têxtil onde já existe uma parceria com a universidade para a realização de projetos e estudos sobre lavanderias têxteis. Com isso, foi aprovado que o experimento fosse colocado nas instalações e que o lodo produzido também fosse utilizado. O nome da empresa não será divulgado para fins de confidencialidade das informações.

Esta empresa encontra-se localizada no município de Caruaru, e está ativa desde 23 de maio de 2013. É considerada como empresa de pequeno porte pelo CNPJ e possui quadro funcional composto por 31 funcionários. Possui alvará de funcionamento da vigilância sanitária e licença de operação vigente no órgão ambiental CPRH, funciona 9 horas por dia e produz aproximadamente 40 mil peças por mês. Em relação aos insumos, são utilizados tecido jeans,

produtos químicos, água, energia elétrica e biomassa para uso nas caldeiras. O consumo de água fica em torno de 1500 m³ por mês, sendo a fonte principal de abastecimento os caminhões pipa. A empresa possui um sistema de captação de água de chuva, por meio de calhas coletoras, que funciona como fonte alternativa de água nos meses de chuva, complementando a água dos caminhões pipa.

4.2 Experimento

O experimento trata-se de dois protótipos de leito de secagem de lodo feitos com bandejas de alumínio (Figura 14). A um leito do protótipo foi acoplado um trocador de calor de baixo custo (o qual possui o funcionamento baseado em um trocador do tipo carcaça e tubo), também composto por uma bandeja de alumínio, e o outro leito funcionou sem a adição de nenhum trocador, secando apenas com o calor do sol. Sendo o objetivo do experimento comparar a secagem entre os dois protótipos, com auxílio na secagem e sem auxílio na secagem.

Figura 14 - Protótipos de leito de secagem com trocador de calor e sem trocador de calor.



Fonte: Autor (2019).

As bandejas possuem dimensões iguais de 50x50 cm e 9 cm de altura. A bandeja que não recebeu nenhum auxílio na secagem do lodo foi denominada

de “sem trocador”, e a que recebeu o trocador de calor foi nomeada de “com trocador”.

Na “com trocador” foi adicionada uma serpentina de cobre de 3/8” de aproximadamente 2 m de comprimento, por onde passou a água aquecida no trocador de calor, trocando calor com o lodo por baixo. Na entrada e na saída da serpentina estavam acopladas mangueiras, que faziam a ligação entre a “com trocador”, o trocador de calor e a bomba. A bomba foi utilizada como auxílio para que ocorresse o fluxo contínuo da água, sendo esta de capacidade de 150 L/h, usada na sua velocidade máxima e estando localizada em uma caixa de isopor com água constante. Sendo esse sistema conectado à energia elétrica através de uma extensão (Figura 15).

Figura 15 - Sistema de funcionamento do protótipo “com trocador”.



Fonte: Autor (2019).

A bandeja que forma o trocador de calor possui dimensões de 32x24 cm, dentro dela passa uma serpentina de cobre de 3/8” com aproximadamente 1m de comprimento e é tampada por um vidro de 4 mm de espessura (Figura 16).

Através da serpentina a água foi aquecida pelo calor do sol após a passagem pelo vidro e seguiu para a bandeja “com trocador”.

Figura 16 - Trocador de calor solar de baixo custo.



Fonte: Autor (2019).

4.3 Classificação do lodo

Um dos resultados finais do tratamento do efluente na lavanderia é o lodo. Este resíduo sólido é gerado em grandes quantidades (Figura 17), provocando custos financeiros para que ocorra a sua destinação final ambientalmente correta no aterro sanitário, além de impactos ambientais oriundos do transporte até o local de destino final (CASTRO et al., 2015).

Figura 17 - Efluente no leito de secagem (início do processo de secagem).



Fonte: Autor (2019).

De acordo com a NBR 10004 de 2004, os lodos provenientes das lavanderias têxteis são classificados como resíduos classe II A. Este tipo de resíduo pode apresentar propriedades como solubilidade em água, biodegradabilidade e combustibilidade (Figura 18) (SANTOS, 2013; RIBEIRO; ALBUQUERQUE JUNIOR; ALENCAR, 2016; LORENA, 2018). Por este fato, o lodo deve ser encaminhado à aterros sanitários industriais que comportem este tipo de resíduo.

Figura 18 - Lodo no leito de secagem (final do processo de secagem).



Fonte: Autor (2019).

A redução da umidade presente no lodo, mesmo após o período de secagem no leito, foi considerada uma alternativa para a diminuição do impacto ambiental causado pelo transporte até a destinação final do resíduo (Figura 19).

Figura 19 - Lodo estocado para destinação final.



Fonte: Autor (2019).

4.4 Medições, coletas e ensaios

4.4.1 Medições

Foram realizadas no experimento medições de profundidade e temperatura do lodo. Além de medições de temperatura da água na entrada e na saída do trocador de calor.

As medições realizadas no experimento “com trocador” e no “sem trocador” foram as mesmas, nove pontos para medição de temperatura (Figura 20) e um ponto para medição de profundidade do lodo (Figura 21). As profundidades foram medidas com o auxílio de uma régua de material plástico com 30 cm de comprimento. Já para a medição das temperaturas nos pontos foi utilizado um termômetro digital tipo espeto (Figura 22).

Figura 20 - Pontos de medição da temperatura do lodo.



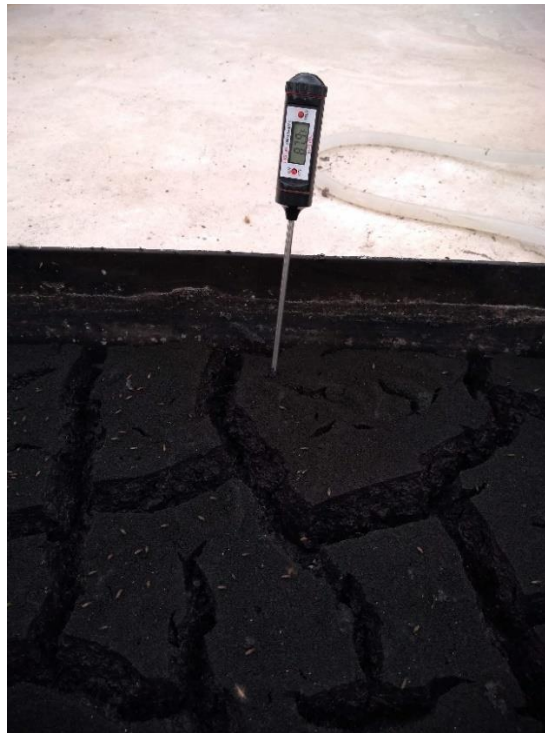
Fonte: Autor 2019.

Figura 21 - Medição de profundidade.



Fonte: Autor 2019.

Figura 22 - Medição da temperatura com termômetro tipo espeto.



Fonte: Autor (2019).

As temperaturas de entrada e de saída da água do trocador de calor foram medidas com o auxílio de um termômetro de infravermelho (Figura 23) apontado aos pontos mostrados na Figura 24. Ressaltando que o trocador se manteve com inclinação de aproximadamente $08^{\circ}17'00''$ direcionado para o norte geográfico, seguindo a latitude da cidade de Caruaru, para que a incidência solar fosse mais eficiente. Após a medição foram realizados cálculos de diferença de temperatura para avaliar se estava existindo alguma diferença entre as mesmas, conforme a equação:

$$\Delta T = T(SAA) - T(EAA)$$

Onde: ΔT = Diferença de temperatura

T (SAA) = Temperatura de saída da água

T (EAA) = Temperatura de saída da água

Figura 23 - Termômetro infravermelho.



Fonte: incoterm.com.br (2019)

Figura 24 - Pontos de medições da temperatura da água no aquecedor solar.



Fonte: Autor (2019).

Onde: PSA = Ponto de saída da água

PEA = Ponto de entrada da água

As medições foram realizadas em conjuntos de 6 para cada descarte de lodo realizado. Ao todo foram 7 descartes, entre os meses de maio e outubro de 2019. As primeiras medições ocorreram nos dias de descarte, as últimas sempre

quando o experimento “com trocador” se encontrava totalmente seco, já as quatro demais ocorreram em intervalos de dias entre o primeiro e o último, para que pudesse ser avaliado a eficiência da secagem com o passar do tempo.

4.4.2 Coletas

As coletas do lodo para análise de umidade ocorreram nos momentos em que o experimento “com trocador” encontrava-se totalmente seco. Foram coletadas amostras dos nove pontos em que eram realizadas as medições de temperatura. As amostras eram acondicionadas em potes plásticos identificados (Figura 25) e os mesmos armazenados em isopores para o traslado até o laboratório, mantendo as condições de temperatura e umidade.

Figura 25 - Potes de coleta de amostras identificados com o ponto coletado.



Fonte: Autor (2019).

4.4.3 Ensaio

Os ensaios de umidade realizados seguiram as recomendações do Manual de Métodos de Análise de Solos da Embrapa (1997), onde foram analisadas a umidade presente nas amostras de lodo do experimento “com

trocador” e do “sem trocador”, para que fosse realizada a comparação entre os métodos.

Para cada um dos nove pontos coletados foram separadas duas amostras, totalizando 18 amostras para cada experimento (Figura 26). As amostras de aproximadamente 20g foram colocadas em placas de Petri, pesadas em balança digital e transferidas para uma estufa a 105°C onde passaram 24 horas (Figura 27).

Figura 26 - Amostras preparadas para a estufa.



Fonte: Autor (2019).

Figura 27 - Amostras na estufa a 105°C.



Fonte: Autor (2019).

Após as 24 horas, as amostras foram retiradas da estufa e após esfriarem ocorreu a pesagem. Com os dados obtidos antes e após a estufa foram realizados os cálculos da umidade gravimétrica, conforme a equação:

$$\text{Umidade Gravimétrica} = 100 (a - b)/b$$

Onde: a = peso da amostra úmida (g)

b = peso da amostra seca (g)

4.5 Eficiência de secagem do lodo

Para a avaliação da eficiência de secagem do lodo foram analisados os resultados dos cálculos de umidade gravimétrica obtidos nos ensaios. Com estes dados foi possível realizar a comparação entre a capacidade de secagem do experimento “com trocador” e a do “sem trocador”. Onde a média da porcentagem de umidade nos pontos demonstra a capacidade de secagem de

cada experimento. Assim, foram contabilizados os dados para que possam ser avaliadas as diferenças de presença de umidade em cada experimento.

4.6 Viabilidade econômica e ambiental

Para a análise da viabilidade econômica e ambiental foram analisados os custos da lavanderia com a disposição correta do lodo, através de informações obtidas em entrevistas com o gerente da empresa onde foi realizado o experimento. Após a coleta dos dados e das análises de umidade, foi realizada a comparação e a simulação da diferença de custos de transporte do lodo quando secado no leito tradicional e do lodo quando secado pelo experimento. Além disso, foram reunidos todos os gastos relativos com o experimento para que pudesse ser analisada a viabilidade de montagem em grande escala.

5 RESULTADOS

5.1 Caracterização e destinação do lodo

Após os ensaios realizados foi possível analisar a caracterização referente à umidade presente no lodo, observando a diferença existente na secagem do leito “com trocador” (CT) e do leito “sem trocador” (ST). Na tabela 1 estão relacionados os resultados obtidos após os ensaios de umidade, são relacionadas as médias dos resultados dos pontos analisados durante os ensaios.

Tabela 1 - Resultados do ensaio de umidade “CT” e “ST”.

| Data | Ensaio | CT (%U) | ST (%U) |
|------------|--------|---------|---------|
| 08/05/2019 | 1 | 62,71 | 89,06 |
| 20/05/2019 | 2 | 2,73 | 78,29 |
| 09/07/2019 | 3 | 6,67 | 80,31 |
| 28/08/2019 | 4 | 38,06 | 75,90 |
| 19/09/2019 | 5 | 9,88 | 14,32 |
| 02/10/2019 | 6 | 4,44 | 35,83 |

| | | | |
|------------|---|------|-------|
| 16/10/2019 | 7 | 8,84 | 21,24 |
| 31/10/2019 | 8 | 1,11 | 3,33 |

Fonte: Autor (2019).

A partir destes resultados é possível concluir que a umidade presente na bandeja “com trocador” é bem menor do que a presente na “sem trocador”, fazendo com que o lodo esteja menos encharcado para o posterior envio ao aterro (Figura 28). Ressaltando que o clima no período do ensaio foi um fator importante para a avaliação da umidade. Por exemplo, nos resultados do ensaio 1 e ensaio 4 a porcentagem de umidade (%U) encontrada foi bem maior do que nos outros ensaios para o “CT”. Isto ocorreu devido à influência das chuvas constantes que ocorreram neste período na cidade de Caruaru. Já nos ensaios 7 e 8, podem ser observadas as diminuições das diferenças entre os resultados em “CT” e “ST”, já que o clima nesta época é de sol constante e altas temperaturas (FRANÇA et al., 2018).

Figura 28 - Lodo proveniente do leito “ST” (lado esquerdo), lodo proveniente do leito “CT” (lado direito).

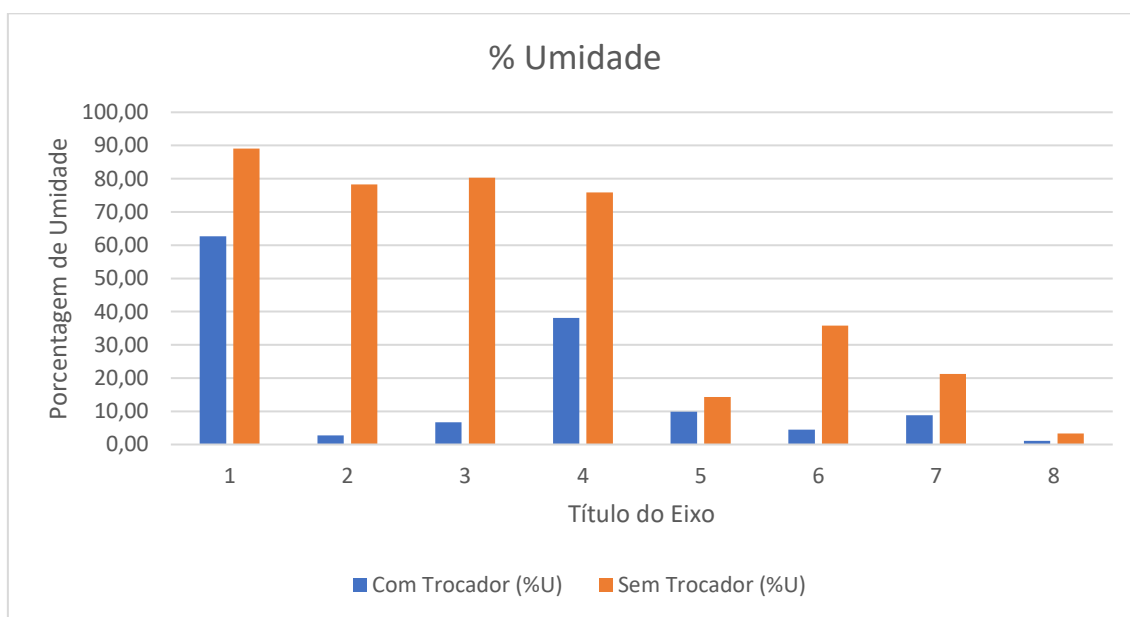


Fonte: Autor (2019).

Nos estudos de Lorena (2018), foram relatados dados de análise de umidade do lodo com 0 dias, 30 dias e 60 dias de saída do leito de secagem. Com 0 dias o lodo obteve umidade de 35%, com 30 dias houve a diminuição em 8%, chegando aos 60 dias com redução de 30% de sua umidade. Com isso, pode-se dizer que o uso do trocador de calor como auxílio da secagem acelera

o processo diminuindo a umidade presente no lodo e também diminuindo os dias necessários para que o resíduo chegue na umidade ideal para o descarte. Já que todo o processo de secagem durou de 13 a 16 dias, aproximadamente. No gráfico 1, a seguir, estão demonstradas as porcentagens de umidade presentes no “CT” e “ST” nos 8 ensaios realizados.

Gráfico 1 - Médias da porcentagem de umidade presente nas amostras.



Fonte: Autor (2019).

Com relação à destinação do lodo, a NBR 10004 de 2004 classifica como resíduos de classe II A os lodos provenientes das lavanderias têxteis, não podendo ser descartados de maneira qualquer no meio ambiente, seu destino final deve ser um aterro sanitário. Segundo Lorena (2018), o aterro local da cidade Caruaru não comporta este tipo de resíduo, sendo necessário que seja encaminhado para a Central de Tratamento de Resíduos (CTR) em Jaboatão dos Guararapes, localizada a cerca de 130 km de Caruaru. Esta condição faz com que as lavanderias de beneficiamento de jeans possuam um gasto para que o lodo seja destinado corretamente e possam estar em conformidade com a legislação.

Como alternativa para a destinação final do lodo, Souto (2017) relata a possibilidade do reuso do lodo como matéria prima local, diminuindo o custo com

transporte e disposição em aterros e substituindo alguma matéria prima em outros segmentos da indústria local. Embora esta possibilidade esteja condicionada ao melhoramento das estações de tratamento de efluente, na tentativa de minimizar ou até mesmo separar de forma eficiente os compostos orgânicos e inorgânicos.

5.2 Sistema de Secagem

O sistema de secagem do lodo existente na lavanderia onde foi realizado o experimento é o tradicional, que ocorre por meio de leitos de secagem (Figura 29). O objetivo desse sistema é reter o lodo proveniente do adensador, para que ele seja desidratado a partir da incidência solar direta. A parte líquida é percolada e direcionada ao corpo receptor e a sólida removida após secagem para a área de estocagem (CAETANO, 2018).

Figura 29 - Sistema de leito de secagem da lavanderia onde foi realizado o experimento.



Fonte: Autor (2019).

Este tipo de secagem é totalmente dependente das condições climáticas, já que depende da irradiação solar para realizar o processo. Segundo Radaidah e Al-Zboon (2011), esse tipo de sistema é fortemente dependente do clima e modificações são essencialmente necessárias para que ocorra a melhoria do desempenho do sistema. Assim, o uso do trocador de calor solar acoplado ao

leito de secagem pode ser considerado como uma alternativa de auxílio na secagem do lodo.

Neste experimento, a secagem do lodo ocorreu com o auxílio de um trocador de calor solar de baixo custo e de tubulações de cobre dispostas no fundo do leito modificado (Figura 30). O trocador de calor aquece a água que passa pelas tubulações, neste momento o lodo presente entra em contato com a tubulação com temperatura elevada e ocorre a troca de calor. Com isso, a secagem do lodo acontece por dois meios: irradiação solar direta e troca de calor. Ocorrendo assim, o aceleração do processo de secagem. Sendo importante ressaltar que o experimento foi instalado ao lado dos leitos convencionais para que pudesse receber as mesmas condições ambientes do local.

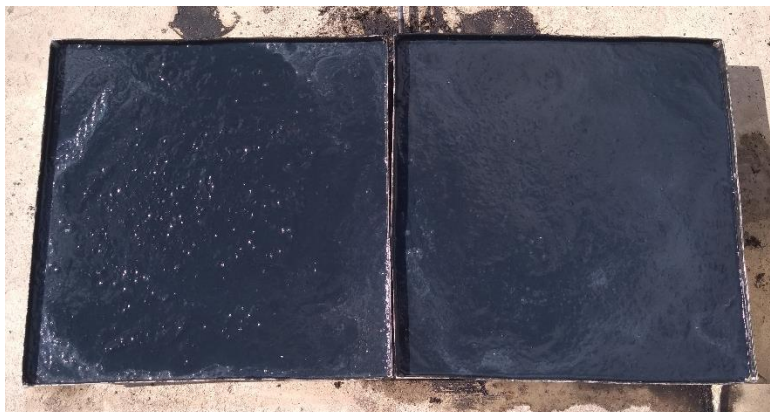
Figura 30 - Sistema de leito de secagem modificado com trocador de calor solar acoplado.



Fonte: Autor (2019).

Como o objetivo principal do experimento foi avaliar a eficiência do auxílio do trocador de calor na secagem do lodo, não foi levado em consideração a percolação existente no sistema de secagem pelo leito tradicional. Tendo assim a presença de uma quantidade maior de líquido no lodo disposto no experimento. Nas figuras 31, 32 e 33 são apresentadas as fases de secagem do experimento.

Figura 31 - Dia de descarte, primeiro dia de medição.



Fonte: Autor (2019).

Figura 32 - Início da segunda semana de medições.



Fonte: Autor (2019).

Figura 33 - Final das medições.



Fonte: Autor (2019).

Segundo o gerente da lavanderia onde o experimento foi instalado, o tempo médio de secagem do lodo no leito é de 15 a 20 dias em tempos de sol constante. Já para épocas nubladas e de chuva, este período de secagem passa para aproximadamente 30 dias para secagem total do lodo. Com o auxílio do trocador de calor o tempo médio de secagem em tempos de sol baixou para 13 a 16 dias, e manteve-se o mesmo para a época nublada e de chuva.

A diminuição no tempo de secagem é um ponto positivo para a lavanderia, já que a operação não pode ficar paralisada pelo fato de não haver local para desaguar o lodo. Por isso, com o uso do trocador de calor pode ocorrer o melhoramento do funcionamento da lavanderia. Onde os procedimentos não serão paralisados e nem diminuídos por causa da demora na secagem do lodo.

5.3 Eficiência energética do leito de secagem acoplado ao trocador de calor solar

Para que possa ocorrer a avaliação da eficiência energética do leito de secagem acoplado ao trocador de calor solar é necessário que sejam avaliados os resultados das medições de temperatura e secagem do experimento, já que estes dados são um dos meios de identificar se existe diferença entre os dois modos de secagem.

Como dito anteriormente, foram realizados 7 descartes com 6 medições de temperaturas e profundidade para os dois tipos de leito experimental, onde essas medições ocorreram em um intervalo de 15 a 20 dias, esta quantidade de dias dependeu se a época do ano é mais chuvosa ou com sol constante.

Em relação à profundidade do lodo foram observadas as diferenças no decorrer dos dias até a secagem total do lodo no leito “CT”, este momento foi usado como referência para o fim do ciclo de medições. Ou seja, quando o “CT” atingiu o nível 0 de profundidade estava no momento de realização da coleta para análise da umidade. Em alguns momentos o “CT” e o “ST” não atingiram o nível 0 ao mesmo momento, o que indica que o “CT” secou numa velocidade maior que o “ST”. Foram medidas também as temperaturas internas do lodo em

cada ponto de coleta, obtendo-se a média de cada leito. O cálculo realizado para comparação entre temperaturas dos leitos foi:

$$\Delta T = T (CT) - T (ST)$$

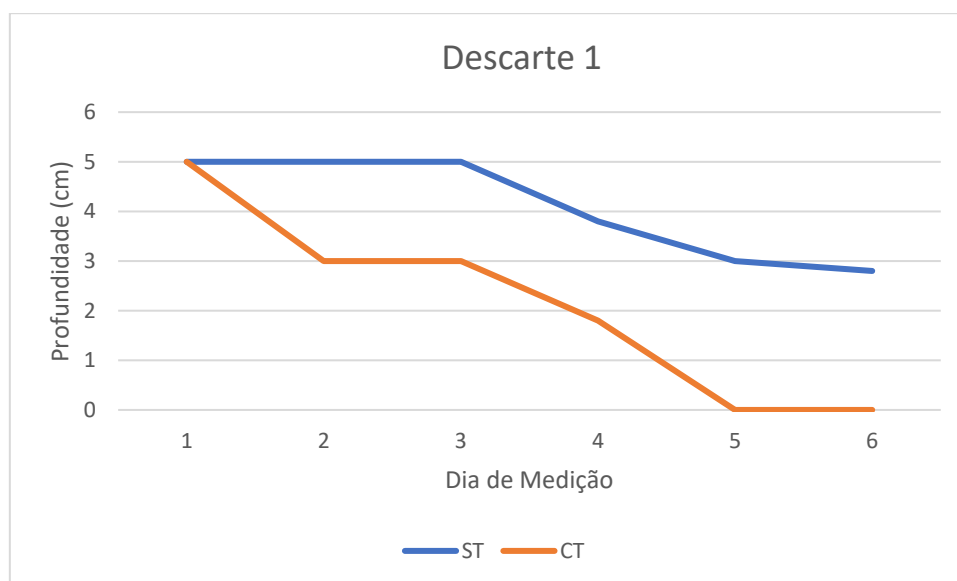
Onde: ΔT = diferença de temperatura

T (CT) = Média da temperatura no “CT”

T (ST) = Média da temperatura no “CT”

No gráfico 2 estão os resultados do primeiro descarte realizado, onde o “CT” atingiu o nível 0 cm antes do “ST” indicando a secagem mais rápida com o auxílio do trocador de calor. Neste período a diferença de temperatura do lodo chegou a 2,36°C, indicando que o lodo no “CT” estava mais quente que o “ST”.

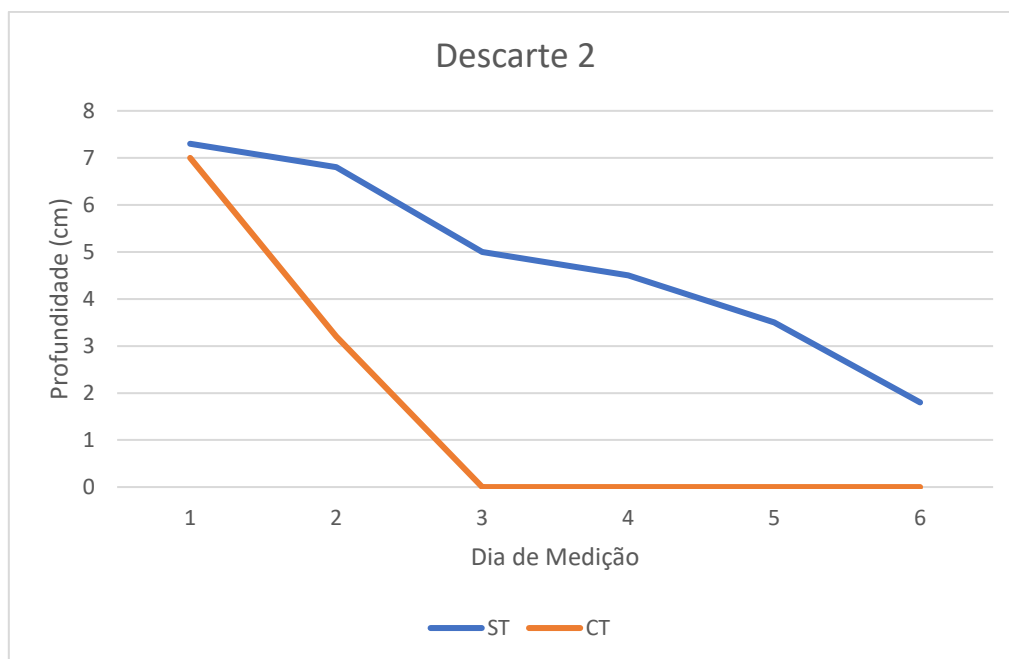
Gráfico 2 - Dados de profundidade do descarte 1.



Fonte: Autor (2019).

Em relação ao descarte 2, devido às altas temperaturas, a secagem no “CT” ocorreu de forma bem mais rápida do que no “ST”, como pode ser observado no gráfico 3. Neste período a diferença de temperatura do lodo chegou a 3,81°C, mais uma vez indicando que o lodo presente no “CT” estava mais quente que o do “ST”.

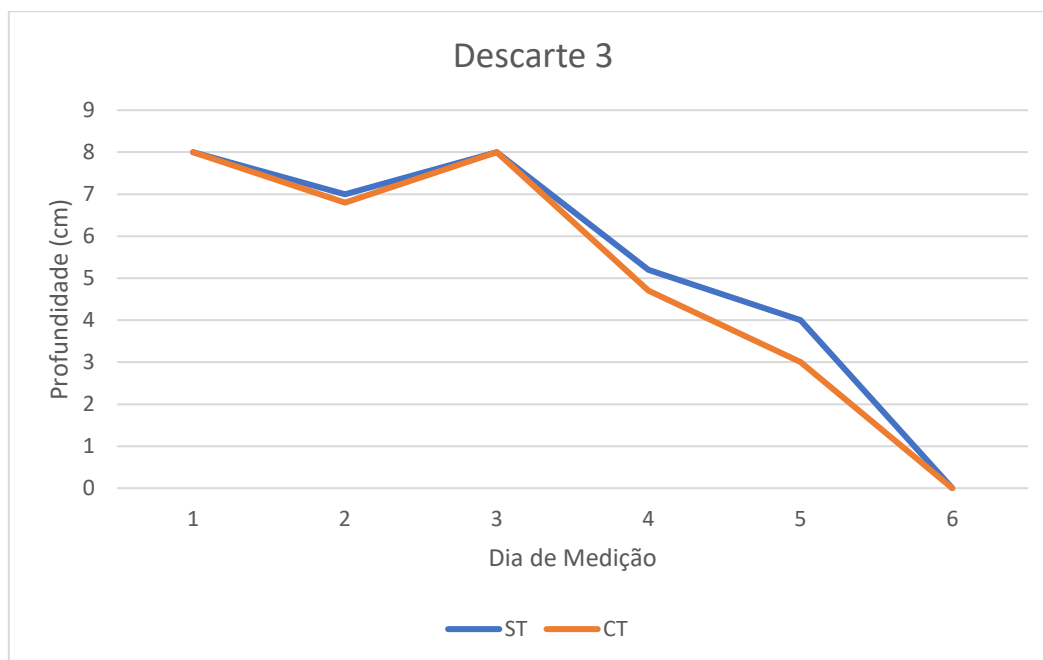
Gráfico 3 - Dados de profundidade do descarte 2.



Fonte: Autor (2019).

Já no período do descarte 3 (entre os meses de julho e agosto), ocorreram dias de fortes chuvas na cidade de Caruaru, o que veio a afetar o funcionamento do experimento, já que foram vários dias de tempo nublado e temperaturas amenas. Por causa disto, o período de secagem foi maior do que 20 dias, até que o lodo no "CT" apresentasse umidade suficiente para que fosse realizada a coleta para ensaio. A maior diferença de temperatura do lodo neste período foi de 2,09°C, constatando que mesmo com as adversidades do clima o lodo no "CT" encontrava-se mais quente que o no "ST". Os resultados das medições de profundidade do descarte 3 podem ser observadas no gráfico 4.

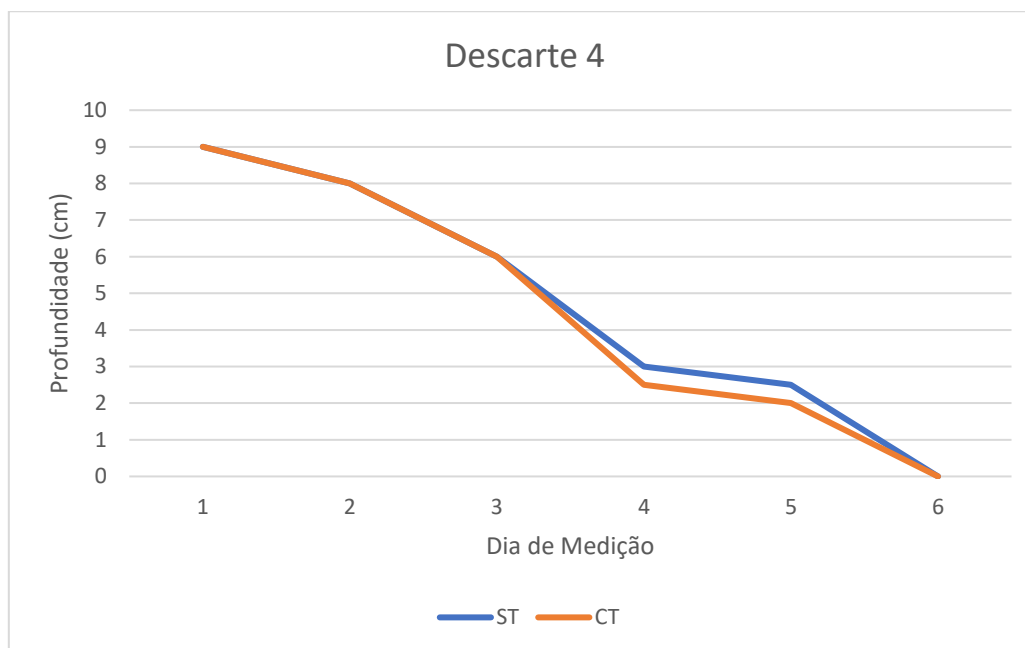
Gráfico 4 - Dados de profundidade do descarte 3.



Fonte: Autor (2019).

No descarte 4 já é possível notar a melhora nas condições climáticas em relação à secagem do lodo (Gráfico 5). Até terceiro dia medição os dois leitos seguiram com a mesma taxa de diminuição da profundidade, na quarta e na quinta medição observou-se a diferença, já que o “CT” apresentou nível mais baixo. Embora na sexta medição tenham chegado com o mesmo nível. A maior diferença entre as temperaturas do lodo neste descarte foi de 6,97°C.

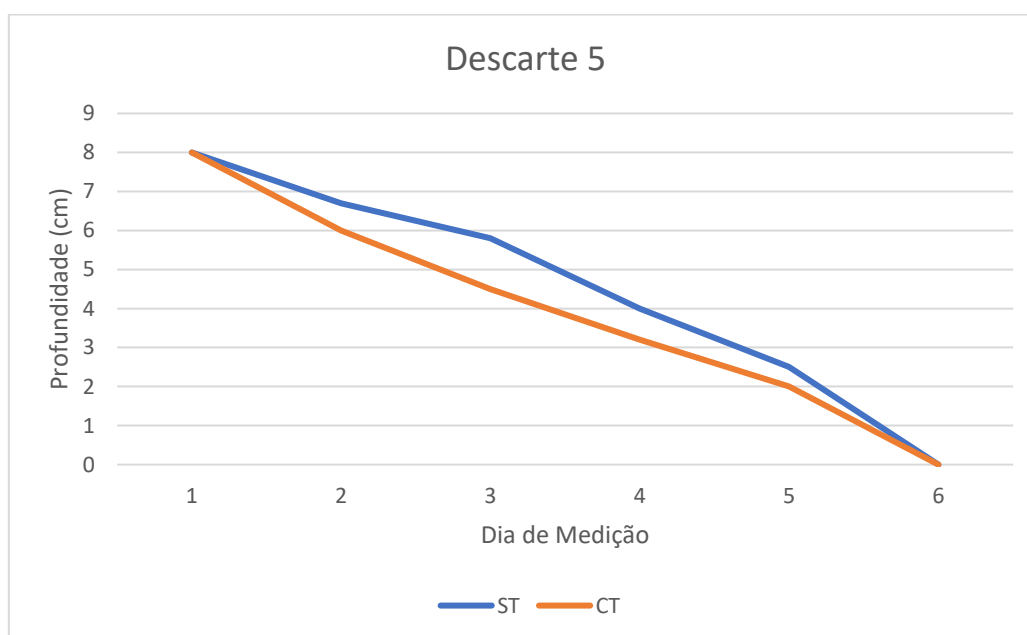
Gráfico 5 - Dados de profundidade do descarte 4.



Fonte: Autor (2019).

Em relação ao descarte 5, pode-se dizer que as medições ficaram bem próximas nos dois leitos, mas predominando a secagem mais rápida do “CT”, como pode ser observado no gráfico 6. Neste período a diferença de temperatura mais alta foi de 7,31°C.

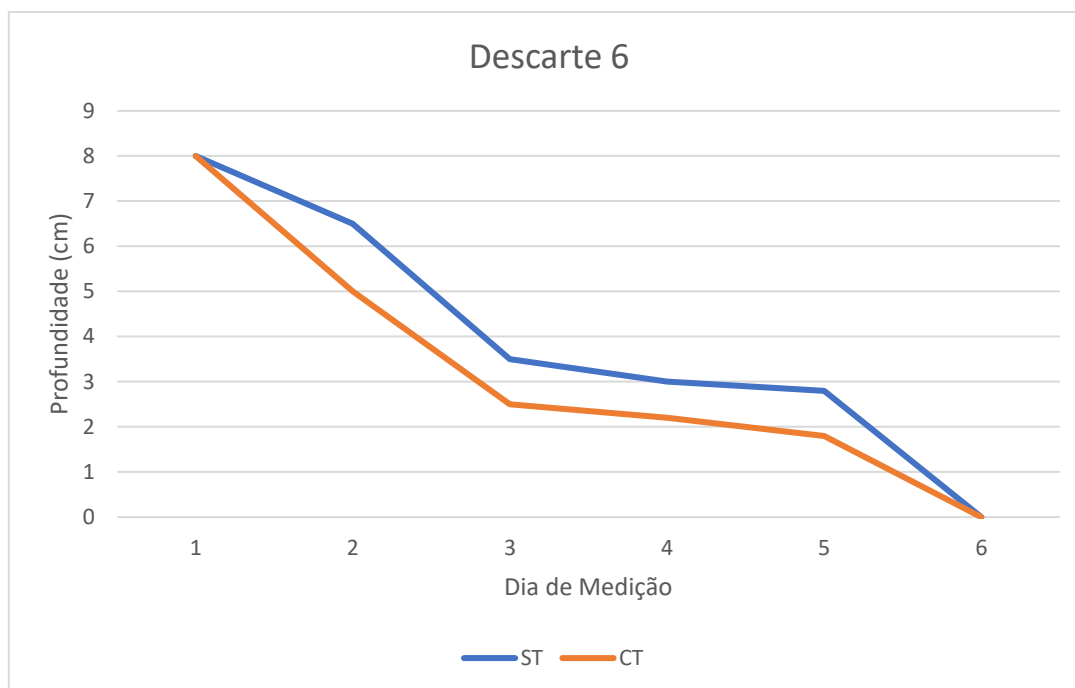
Gráfico 6 - Dados de profundidade do descarte 5.



Fonte: Autor (2019).

No descarte 6 foi mantida a diferença na profundidade, assim como ocorreu no descarte 5, mas com momentos de maior diferença como pode ser visto no gráfico 7. A diferença temperatura do lodo mais elevada foi 5,48°C.

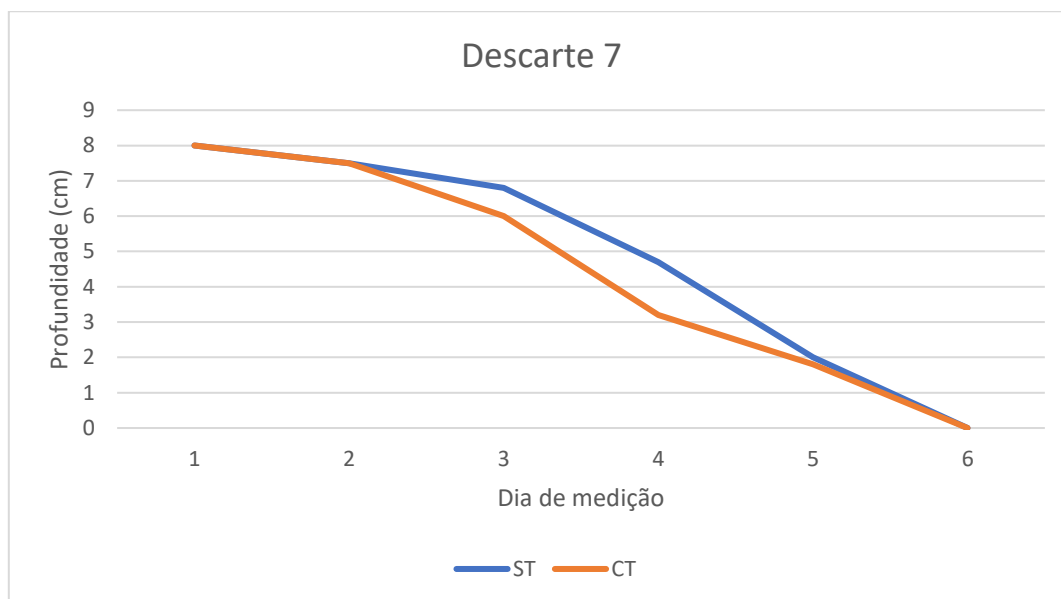
Gráfico 7 - Dados de profundidade do descarte 6.



Fonte: Autor (2019).

Por fim, no descarte 7 foram obtidas profundidades próximas a cada medição, mas mantendo o “CT” como o mais rápido a baixar o nível, como pode ser observado no gráfico 8. O que indica que o mesmo estava com a temperatura mais elevada, sendo a média da temperatura do lodo de 3,8°C.

Gráfico 8 - Dados de profundidade do descarte 7.



Fonte: Autor (2019).

Os resultados obtidos para temperatura do lodo corroboram com os obtidos por Radaidah e Al-Zboon (2011). No estudo dos autores o experimento realizado utilizou placas solares para o aquecimento de água, juntamente com sistema de tubos galvanizados que passavam por baixo da camada de lodo, por onde passava a água aquecida. Segundo os autores, a temperatura do lodo no leito modificado estava sempre em média 5-8°C maior do que no leito convencional.

De maneira geral, o gráfico 9 representa as medições de temperatura do lodo obtidas durante todo o experimento.

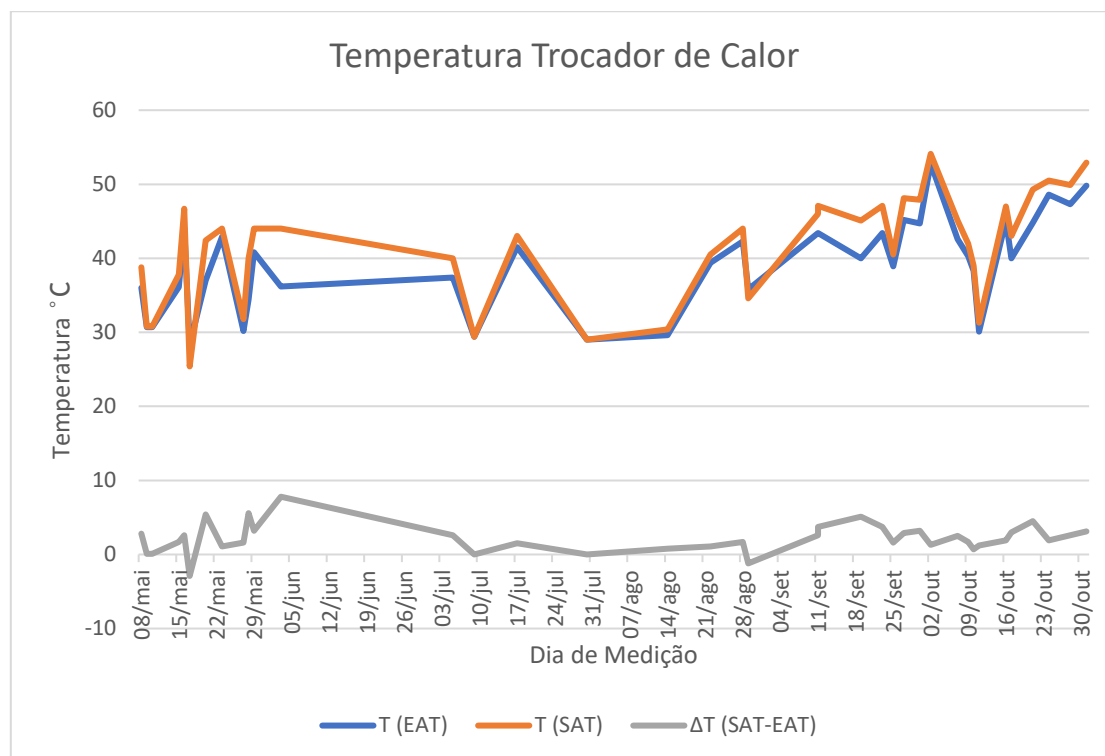
Gráfico 9 - Diferenças de temperatura do lodo.



Fonte: Autor (2019).

No que diz respeito à temperatura de entrada e saída da água do trocador de calor solar, o gráfico 10 demonstra a oscilação dos valores e também momentos de estabilização e igualdade. O que indica que em determinado momento a temperatura manteve-se constante por todo o experimento. Em outros momentos pode-se dizer que não houve aumento da temperatura devido ao fato do clima não estar favorável para aquecimento (como nos dias nublados e momentos de chuva).

Gráfico 10 - Dados de temperatura do trocador de calor.



Fonte: Autor (2019).

O ponto máximo de aquecimento obtido através do trocador de calor foi 54,1°C. Já no experimento de Radaidah e Al-Zboon (2011), os valores de aquecimento da água variaram entre 75 e 91°C, com o uso de placas solares.

Considerando que o experimento em Caruaru foi realizado com trocador de calor de baixo custo e foram obtidos resultados satisfatórios em relação à secagem do lodo, temperatura do lodo e de aquecimento da água é possível concluir que o método experimental possui bom funcionamento e pode ser considerado para uso em escala industrial.

5.4 Viabilidade econômica e ambiental

De acordo com o gerente da lavanderia de beneficiamento de jeans onde foi realizado o experimento, a cada 3 meses são gastos de 2 a 3 mil reais com a envio do lodo para o aterro sanitário. Este traslado é realizado por uma empresa credenciada e após todo o procedimento é emitida uma nota fiscal para que possa ser comprovado que a lavanderia fez o correto descarte do resíduo,

servindo de comprovação para uma possível fiscalização dos órgãos competentes.

Sendo importante ressaltar que a cada encaminhamento do lodo para o aterro são transportadas de 5 a 7 toneladas de lodo. Esta quantidade pode variar de acordo com a umidade presente, quando está mais seco a quantidade a ser enviada é maior, quando está mais úmido a quantidade de água presente pode ser significativa. Assim, é importante que seja observada a presença da umidade no momento do transporte, já que o preço a ser pago é em função do peso do lodo.

Com o auxílio do trocador de calor acoplado ao leito de secagem é possível que ocorra a diminuição da presença de água no lodo seco, como mostrado nos tópicos anteriores. Ajudando na diminuição dos custos de envio ao aterro, já que seria possível enviar mais lodo e menos água pelo mesmo valor pago anteriormente.

Segundo Souto (2017), os custos para tratar e dispor resíduos sólidos é um fator consideravelmente importante para a indústria têxtil, já que o custo de uma lavanderia de médio porte, para disposição em aterro industrial fica em torno de R\$ 170,00 à R\$ 200,00 por tonelada, e ainda adicionando o frete mensal até Caruaru que custa em torno de R\$ 1.900,00 por tonelada, variando conforme a empresa prestadora de serviço.

Os custos para a montagem do experimento ficaram em torno de R\$ 500,00, o que inclui as bandejas, a bomba, o vidro, as mangueiras, a extensão, o isopor, as tintas, as colas e as braçadeiras. As serpentinas foram reutilizadas de projetos de refrigeração realizados na universidade. Isto para um “leito” de 0,25 m² e 0,09 m de profundidade e um trocador de calor de 0,077 m².

Ao calcularmos para a implantação do sistema para o leito convencional que possui 12,5 m² e 1,20 m de profundidade, o trocador de calor deve ter aproximadamente 3,75 m² de área para que possa suprir o tamanho do leito convencional de forma satisfatória. Este valor foi verificado através da equação:

$$\frac{\text{área do coletor}}{\text{área do leito}} \sim 0,30$$

Sendo assim, para a montagem do sistema para o tamanho real os custos de compra de material podem ser analisados por proporcionalidade, já que o leito experimental tem tamanho proporcional ao convencional. Levando em consideração que não seria necessário a compra de bandejas de alumínio, já que o leito já está pronto, o custo maior de instalação seria referente à serpentina de cobre e à montagem do trocador de calor.

Após pesquisas de preço em lojas especializadas, foi verificado que o preço por metro da serpentina de cobre 3/8" é em média R\$15,00. Logo, para suprir o tamanho do leito convencional (12,5 m²) seriam gastos aproximadamente R\$190,00, e para o trocador de calor (3,75 m²) aproximadamente R\$57,00. Sendo assim, é possível estipular o valor de R\$1.500,00, para que possam ser realizadas as mudanças no local e compra dos demais materiais necessários. Sendo este valor gasto uma única vez e recompensado a partir do momento que o sistema cooperasse com a diminuição da umidade presente no lodo que deve ser enviado para o aterro sanitário.

Com a adaptação dos leitos convencionais ao uso do trocador de calor como auxílio na secagem do lodo, a tendência é que os custos com transporte para o aterro diminuam. Já que estarão sendo transportados um volume maior de lodo sem a presença de umidade elevada. O custo de instalação do trocador de calor será "pago" pelo volume a mais de lodo que será transportado a cada vez que a empresa precisar fazer o descarte.

Assim, a instalação do trocador de calor pode ser considerada uma boa opção para a economia de recursos financeiros e também para a preservação do meio ambiente. Segundo Lorena (2018), os impactos gerados pela atividade do leito de secagem incluem o risco de contaminação do solo por lodo, a percolação de líquidos no solo e o possível contato com os corpos hídricos. O lodo mais seco geraria menos resíduos nos aterros e a poluição causada no

momento do transporte até o local também diminuiria, já que o número de viagens Caruaru – Jaboatão seria menor.

6 CONCLUSÃO

Diante do que foi visto e acompanhado nas visitas às lavanderias de beneficiamento de jeans foi identificado o processo de obtenção e destinação/disposição do lodo produzido. O lodo é estocado para posterior descarte após a sua passagem pelo leito de secagem. Este descarte ocorre de forma terceirizada até o aterro sanitário, de forma legal e com comprovantes de legalidade ambiental do procedimento.

Os dados obtidos após a secagem do lodo residual pelo leito tradicional mostram que este lodo ainda possui um teor de umidade elevado, cerca de 30%. Com a montagem do sistema de leito de secagem acoplado com trocador de calor solar foi possível obter dados mais eficientes e positivos em relação à presença de umidade no lodo residual.

Após o experimento com leito modificado os resultados mostram que a secagem do lodo residual ocorreu de modo eficiente, diminuindo a quantidade de dias para secagem (15 a 20 dias para 13 a 16 dias) e também o teor de umidade presente no resíduo. Onde a umidade do lodo “com trocador” ficou em média 16,81% e para a umidade do lodo “sem trocador” foi obtido o resultado médio de 49,79%. No entanto, em dias nublados e de chuva não foi possível observar diferenças em relação ao uso ou não do trocador de calor solar. Isto ocorreu devido ao fato do sistema ser totalmente dependente das condições climáticas. Por isso, este ponto precisa ser melhor elaborado e estudado, para que não venha a afetar negativamente o funcionamento do sistema.

De modo geral, a montagem e execução do sistema é considerada viável. Isto ocorre devido ao fato do sistema funcionar de maneira eficiente e colaborar para a diminuição de custos de disposição final do resíduo, já que a quantidade de água enviada junto com o lodo será aproximadamente 33% menor. Podendo ser considerado um investimento que obtenha retorno a médio e longo prazo,

levando em conta que a manutenção do sistema não é cara e não precisa ser feita constantemente.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. M. B. Roupas sujas se lavam em casa: A seca no agreste Pernambucano e a Gestão Ambiental na Lavanderia Água Limpa. **Administração Pública e Gestão Social**. V. 5, p. 134-138, 2013.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AMARAL E SILVA, M. V.; SILVA, A. L.; BRITO, D. J. M.; BRANCO, D. K. S.; FERREIRA, M. O. A Questão Ambiental no Polo de Confecções de Caruaru: Um primeiro ensaio a luz dos instrumentos Econômicos de Proteção Ambiental. In **IX Encontro da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica**, Brasília – DF, 2011.

ANDRADE, T. S. **A estrutura institucional do APL de confecções do agreste Pernambucano e seus reflexos sobre a reoperação e inovação**: O caso do município de Toritama. 2008, 219f. Dissertação (Mestrado em Economia) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO. **Perfil do Setor 2018**. Disponível em: <<https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>>. Acesso em: 29 ago 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12209**: Projeto de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário. Brasília, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA INDÚSTRIAS TÊXTIL E DE CONFECÇÕES. **Setor Têxtil e Confecções no Brasil**. Brasília, 2013.

BASE DE DADOS DO ESTADO DE PERNAMBUCO. Governo de Pernambuco. <http://www.bde.pe.gov.br/visualizacao/Visualizacao_formato2.aspx?CodInformacao=884&Cod=1>. Acesso em: 29 ago 2019.

BRASIL, **Resolução Conama n. 001**, de 23 de janeiro de 1986. Estabelecem as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente

BRASIL, **Resolução Conama n. 20**, de 18 de junho de 1986. Dispõe sobre a classificação das águas doces, salobras e salinas do Território Nacional.

BRASIL, **Resolução Conama n. 237**, de 19 de dezembro de 1997. Dispõe sobre licenciamento ambiental; competência da União, Estados e Municípios; listagem de atividades sujeitas ao licenciamento; Estudos Ambientais, Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental.

BRASIL, **Resolução Conama n. 357**, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

BRASIL, M. V. de O.; ABREU, M. C. S. de; SILVA FILHO, J. C. L. da & LEOCÁDIO, A. L. . (2016). Relationship between eco-innovations and the impact on business performance: an empirical survey research on the Brazilian textile industry. **Revista de Administração**, 51 (3), July-September, p. 276-287.

BRASIL. Lei n. 1.413 de 31 de julho de 1975. Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 31 de jul. 1975.

BRASIL. Lei n. 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 02 de ago. 2010.

BRASIL. Lei n. 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 08 de jan. 1997.

BRASIL. Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 12 de fev. 1998.

BRASIL. Ministério da Economia Indústria, Comércio Exterior e Serviços. **Arranjos Produtivos Locais – APL**. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/index.php/competitividade-industrial/arranjos-produtivos-locais>>. Acesso em: 29 ago 2019.

BRITO, G. A. Sustentabilidade: um desafio para as lavanderias industriais. **Revista de Design Inovação e Gestão Estratégica**, v. 4, n. 2, ago. 2013.

CAETANO, C. R. S. **Alternativas de aplicação de lodo gerado em estações de tratamento de água**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Centro Universitário de Formiga - UNIFOR, Formiga, 2018.

CASTRO, T. M.; TAVARES, C. R. G.; LISOT, A.; KAMINATA, O. T. Caracterização de blocos cerâmicos acústicos produzidos com incorporação de

lodo de lavanderia têxtil. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.20, n.1, p. 47-54, mar. 2015.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa – uma abordagem pratica**. 4ª edição. AMGH Editora Ltda. 2012.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Relatório de Qualidade das Águas Superficiais**. Apêndice C - Índices de Qualidade das Águas. World Wide Web electronic publication. 2013.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Serviço geológico do Brasil. **Projeto Cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea -Diagnóstico do município de Caruaru**, 24 p. Recife, 2005.

COSTA, A. F. S.; ALBUQUERQUE, C. D. C.; SALGUEIRO, A. A.; SARUBBO, L. A.. Color removal from industrial dyeing and laundry effluent by microbial consortium and coagulant agents. **Process Safety and Environmental Protection**, 2018.

CURI, P. F. **Estudo Da Viabilidade Econômica Da Utilização De Secador Térmico Rotativo De Lodos Como Alternativa De Redução Do Volume De Lodos Têxteis**. 2007. 42 p. Monografia (Engenharia Sanitária e Ambiental) — Universidade Federal de Santa Catarina.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro, 1997.

FRANÇA, M.V. de et al. Aptidão climática para o cultivo da banana em Caruaru-PE, Brasil. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 3, n. 3, p. 265-274, 2018.

GARDENAL, A. L.; SGUÁRIO, M. K. . **Análise do Desempenho de Trocadores de Calor**. 2016. 58f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social** – 6 ed. – São Paulo. Atlas, 2008.

HASANBEIGI, A.; PRICE, L. A review of energy use and energy efficiency Technologies for the textile industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. V. 16, p. 3648-3665, 2012.

HEDLUND, K. F. S. **Adensamento de lodo de estação de tratamento de água: comparação entre sedimentação e flotação**. Dissertação Mestrado, UFSM, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2016.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamento de transferência de calor e de massa**. LTC - Rio de Janeiro. 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - Caruaru. 2017. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/caruaru/panorama>> Acesso em: 22 de maio de 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2015. Disponível em: <www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2015/estimativa_dou.shtm>. Acesso em: 12 jan 2019.

INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO. **Arranjos Produtivos Locais**. Disponível em: <<http://www.itep.br/arranjos-produtivos-locais>>. Acesso em: 29 ago 2019.

LORENA, E. M. G. **Monitoramento dos impactos ambientais das lavanderias de beneficiamento têxtil**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2018.

MEDEIROS, R. M. 2017. Estudo agrometeorológico e balanço hídrico para o Estado do Pernambuco. 125p., Divulgação avulsa.

MUCELIN, C. A.; BERLLINI, M. Lixo e impactos ambientais perceptíveis no ecossistema urbano. **Revista Sociedade & Natureza** (Online), Uberlândia, v. 20, n. 1, 111-124, jun. 2008.

MYMRIN, V.; ALEKSEEV, K.; NAGALLI, A.; CATAI, R. E.; ROMANO, C. A. Red ceramics enhancement by hazardous laundry water cleaning sludge. **Journal of Cleaner Production**, v. 120, 1 May 2016, p. 157-163.

MYMRIN, V.; SANTOS, C. F.G.; ALEKSEEV, K.; AVANCI, M. A.; RUY, V. A. . **Applied Clay Science**, v. 155, April 2018, p. 95-102.

PEREIRA, V. E. **Disposição de lodo adensado de ETA em ETE com tratamento primário quimicamente assistido**. 2011. 170 p. Dissertação de Mestrado (em Saneamento e Ambiente) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

PERNAMBUCO. Lei complementar n. 041, de 20 de dezembro de 2013. Prefeitura Municipal de Caruaru.

PERNAMBUCO. Lei municipal de Caruaru n. 5.058, de 25 de novembro de 2010. Licenciamento Ambiental. Prefeitura Municipal de Caruaru.

PERNAMBUCO. Lei orgânica do município de Caruaru, de 17 de julho de 2014. Prefeitura Municipal de Caruaru.

PIETROBON, C. L. da R. et al. Estudos preliminares sobre estabilização/solidificação - e/s -de lodo de tratamento de lavanderia têxtil para reutilização como argamassa de construção:exame de caso para Maringá, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 24, n. 6, p. 1659– 1664, 2002.

RADAIDAH, J. A.; AL-ZBOON, K. K.; Increase the Efficiency of Conventional Sand Drying Beds by using Intensive Solar Energy: A case study from Jordan. 2nd International Conference on Environmental Science and Technology. **IPCBE** vol.6 (2011). IACSIT Press, Singapore.

RIBEIRO, M. C. B.; ALBUQUERQUE JUNIOR, E. C.; ALENCAR, B. S. Resíduos sólidos gerados em uma lavanderia de beneficiamento de *jeans* em Toritama-PE: diagnóstico e destinação. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E V ENCONTRO PERNAMBUCANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2016, Recife. Resíduos sólidos: o desafio do GIRS face aos objetivos do desenvolvimento sustentável. **Anais...** Recife: Editora UFRPE, 2016.

RICHTER, C. A. Tratamento de lodos de estações de tratamento de água. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.p.1-74.

ROSE, J. L.; MAHLER, C. F.; IZZO, R. L. dos S.; Comparison of the methane oxidation rate in four media. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, June 2012, v. 36, n. 3, p. 803-812.

SANTOS, C. F. G. **O efeito da adição de lodo de lavanderia industrial em material cerâmico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2013. 63p.

SERVIÇO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS DO ESTADO DE PERNAMBUCO. **Estudo Econômico do Arranjo Produtivo Local de Confeccões do Agreste Pernambucano**, 2012. Recife, 2013. Disponível em <<http://www.aplconfeccaope.com.br/wp-content/uploads/2015/02/Estudo-Economico-do-APL-de-Confeccoos-SEBRAE-07-de-MAIO-2013.pdf>>. Acesso em: 29 ago 2019.

SILVA FILHO, A. R. A. da. **Desenvolvimento de Sistema Simplificado de Gestão ambiental Aplicado a Micro e Pequenas Empresas de Beneficiamento de Jeans**. Recife-PE, 2013. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

SILVA, G. L. da; BARROS, C. R. & REZENDE, R. B. de. (2005). Diagnóstico ambiental das lavanderias de jeans de Toritama. **Anais ... 23º Congresso Brasileiro de engenharia sanitária e ambiental**, Campo Grande, Minas Gerais.

SILVA, M. V. A.; SILVA, A. L.; BRITO, D. J. M.; BRANCO, D. K. S.; FERREIRA, M. O. **A questão ambiental no pólo de confeccões de Caruaru: Um primeiro ensaio à luz dos instrumentos econômicos de proteção ambiental**. Revista Estudos do CEPE, Santa Cruz do Sul, n35, p.108-132, jan./jun. 2012.

SILVEIRA, C. **Desaguamento de lodo de estações de tratamento de água por leito de drenagem / secagem com manta geotêxtil**. Dissertação Mestrado, Universidade Estadual de Londrina – UEL. Londrina, Paraná, 2012.

SOUTO, T.J.M.P. **Estudo do comportamento químico e ambiental de efluentes industriais e resíduos sólidos oriundos de lavanderias do polo têxtil no agreste pernambucano.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, 2017.