

CIEA

Congresso Internacional de Engenharia Ambiental
&

10ª REA

Reunião de Estudos Ambientais

ANAIS

Artigos Completos

- VOLUME 3 -

**Sistemas e Técnicas de Tratamento e Disposição de
Resíduos Sólidos**

&

**Reaproveitamento ou Reutilização de Resíduos
Sólidos para geração de novos Produtos e Materiais**



Organizadores

Cristiano Poletto

Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves

Guilherme Fernandes Marques

José Gilberto Dalfré Filho

**ANAIS do Congresso Internacional de
Engenharia Ambiental & 10ª Reunião de
Estudos Ambientais
Artigos Completos**

- VOLUME 3 -

**Sistemas e Técnicas de Tratamento e Disposição de
Resíduos Sólidos**

&

**Reaproveitamento ou Reutilização de Resíduos
Sólidos para geração de novos Produtos e Materiais**



Gráfica & Editora

Toledo – PR

2020

Copyright © 2020, by Editora GFM.

Direitos Reservados em 2020 por **Editora GFM.**

Editoração: Cristiano Poletto

Organização Geral da Obra: Cristiano Poletto; Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves; Guilherme Fernandes Marques; José Gilberto Dalfré Filho

Diagramação: Juliane Fagotti

Revisão Geral: Espaço Histórico e Ambiental

Capa: Eventos Consulting Design Informática

CIP-Brasil. Catalogação na Fonte

Cristiano Poletto; Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves; Guilherme Fernandes Marques; José Gilberto Dalfré Filho (Organizadores)

ANAIS do Congresso Internacional de Engenharia Ambiental & 10ª Reunião de Estudos Ambientais – Artigos Completos – Volume 3 – Sistemas e Técnicas de Tratamento e Disposição de Resíduos Sólidos & Reaproveitamento ou Reutilização de Resíduos Sólidos para geração de novos Produtos e Materiais / Cristiano Poletto; Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves; Guilherme Fernandes Marques; José Gilberto Dalfré Filho (Organizadores) – Porto Alegre, RS: Editora GFM, 2020.

542p.: il.;

ISBN 978-65-87570-03-7

CDU 502.3/.7

É AUTORIZADA a livre reprodução, total ou parcial, por quaisquer meios, sem autorização por escrito da Editora ou dos Organizadores.



LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA METAL MECÂNICA: CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DE SECAGEM

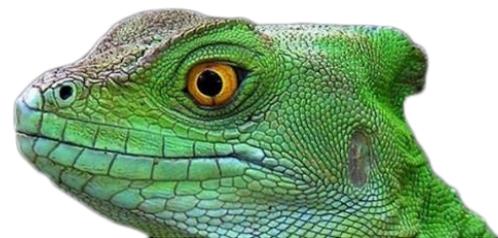
| ID 15807 |

**1Luciana Kaori Tanabe, 2Vitor Otacílio de Almeida, 3Viviana Nedel Reckziegel, 4Douglas Payhani,
5Ivo André Homrich Schneider**

1Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: lkaorita@gmail.com; 2Universidade Federal do Rio Grande
do Sul, e-mail: vitor01almeida@hotmail.com; 3GKN Automotive, e-mail:
viviana.reckziegel@gknautomotive.com; 4GKN Automotive, e-mail: douglas.payhani@gknautomotive;
5Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: ivo.andre@ufrgs.br

| RESUMO |

O setor metal mecânico é de grande importância no cenário econômico do Rio Grande do Sul. A fiscalização dos órgãos ambientais, bem como o interesse das próprias indústrias no que se refere à adequação dos efluentes e resíduos gerados nos processos produtivos, levou a um aumento do emprego de estações de tratamento de efluentes (ETE's). O tratamento dos efluentes industriais normalmente envolve processos físico-químicos associados a processos biológicos e resultam na formação de lodos, classificados como resíduos sólidos, e que necessitam de etapas de desaguamento e secagem a fim de adequá-los para destinação em usinas de coprocessamento e aterros de resíduos sólidos industriais. No entanto, há poucos trabalhos e estudos dedicados ao tema, dificultando o melhor entendimento e gerenciamento deste tipo de resíduo. Com o intuito de contribuir para o segmento, o presente trabalho realizou a caracterização físico-química e um estudo de secagem de três tipos de lodos oriundos de uma indústria metal mecânica que produz peças automotivas localizada em Charqueadas, Rio Grande do Sul. Os lodos estudados foram provenientes dos filtros-prensa das estações que tratam os efluentes oriundos das etapas de lavagem de peças e matrizes (lodo *die cleaning*), da mistura de efluentes de processos de forjaria e usinagem (lodo misto) e, por fim, dos efluentes de usinagem (lodo usinagem). Pelos dados de caracterização físico-química, um dos parâmetros que demonstrou relevância foi o teor de umidade, superior a 50% para as três amostras investigadas. Por essa razão, o entendimento do comportamento térmico dos lodos foi priorizado de modo a otimizar a redução de umidade destes materiais. Realizou-se, em laboratório, um experimento de secagem dos lodos utilizando o método de empilhamento, no qual os lodos foram dispostos em pilhas retangulares sobre superfície drenante, durante quatro semanas, período no qual também foram avaliadas diariamente a temperatura e a umidade relativa do ar. Ao final do período, os lodos *die cleaning*, misto e usinagem apresentaram redução dos teores de umidade para 16,5%, 11,6% e 28,7%, respectivamente. A partir dos dados experimentais, foi determinada a taxa de secagem dos lodos, a qual correlacionou a massa original dos lodos, a quantidade mássica de água perdida e o período de secagem. O lodo *die cleaning* apresentou taxa de secagem de 18,3 g H₂O/kg lodo úmido.dia, o lodo misto, 15,9 g H₂O/kg lodo úmido.dia e o lodo usinagem, 18,7 g H₂O/kg lodo úmido.dia. Foram, então, conduzidos experimentos de secagem dos lodos *die cleaning* e misto em três diferentes locais da empresa de estudo: área externa da ETE e áreas internas do galpão de armazenamento de resíduos sólidos e o aterro de resíduos industriais perigosos (ARIPE). Os lodos foram dispostos em tonéis metálicos e mantidos nos locais durante um período de 72 dias, durante o qual também foram avaliados os mesmos parâmetros meteorológicos com a instalação de sensores. Na ETE, que configurava um ambiente aberto, os valores finais de umidade chegaram a 12,6% e



29,8% para lodo *die cleaning* e lodo misto, respectivamente. No galpão de resíduos e no ARIPE, que configuravam um ambiente metálico e fechado, os valores chegaram, respectivamente, a 34,5% e 2,2% para os lodos *die cleaning* e 44,6% e 39,6% para o lodo misto. A maior taxa de secagem dos lodos foi a do lodo misto disposto na ETE, de 4,8 g H₂O/kg lodo úmido.dia. A menor taxa de secagem dos lodos na empresa pode estar associada ao local em que estiveram dispostos (em tonéis), que limitou a troca de umidade com o ambiente. Por fim, avaliou-se o impacto econômico da redução de umidade dos lodos nos custos da empresa com o transporte e a destinação dos resíduos. Verificou-se que a redução nos custos dessas atividades pode chegar a 48,4%, indicando a importância de pesquisa e inovação tecnológica ao setor.

Palavras-chave: lodos industriais; secagem de lodos; efluentes industriais.

| INTRODUÇÃO |

O setor industrial é de grande importância para a economia e desenvolvimento do país e o estado do Rio Grande do Sul possui papel fundamental na cadeia produtiva do setor metal mecânico (RIO GRANDE DO SUL, 2017). Como exemplo de segmentos importantes das indústrias deste setor temos a indústria automobilística, indústria de autopeças, equipamentos agrícolas e equipamentos eletroeletrônicos. O setor gera bens, renda e empregos, fatores importantes para a economia (MARSON, 2014). No entanto, a atividade industrial está, inevitavelmente, associada à degradação ambiental, sendo que a magnitude e significância dos impactos ambientais dependem do tamanho da indústria, das atividades realizadas e das formas de gerenciamento ambiental por ela adotadas. Nesse sentido, é percebido um aumento no rigor da legislação ambiental e o desenvolvimento de normas técnicas voltadas ao setor industrial, ao mesmo tempo em que as empresas buscam por metodologias mais sustentáveis para os processos produtivos.

Diversas empresas e, principalmente, indústrias, têm adotado as estações de tratamento de efluentes (ETE's) para adequar a emissão de seus efluentes aos padrões das legislações ambientais vigentes, adaptadas de acordo com as necessidades da indústria e características dos efluentes. Dentre as etapas comumente empregadas nos processos de tratamento de efluentes, destacam-se a coagulação e floculação, responsáveis pela remoção de sólidos suspensos e precipitação seletiva de contaminantes. Como resultado, são gerados lodos que, após etapa de redução da umidade, necessitam de alternativas ambientalmente adequadas para disposição, que atualmente se resumem a aterros de resíduos sólidos industriais, à incineração e, também ao coprocessamento (CAVALCANTI, 2012). Segundo Andreoli (2001), muitos projetos de estações de tratamento de efluentes ignoram a forma de destino dos lodos, dificultando o gerenciamento adequado dos resíduos e ocasionando a adoção de medidas de caráter emergencial e com elevado custo associado.



Uma forma de reduzir os custos associados ao gerenciamento adequado desses resíduos é garantir uma etapa satisfatória de desaguamento e redução de umidade dos lodos, uma vez que o custo dos serviços de transporte e disposição adequada é associado à quantidade, em toneladas, de resíduo a ser destinado. Diversas metodologias para redução de umidade dos lodos já são amplamente conhecidas e empregadas em diversos setores industriais, tais como a centrifugação, filtros prensa, secagem térmica, leitos de secagem, entre outros, que alcançam teores de umidade final do lodo da ordem de 30 a 50%. (ANDREOLI, 2001; CAVALCANTI, 2012). Novas tecnologias estão sendo desenvolvidas, como o desaguamento por meio de vibrações de ultrassom, por exemplo, porém ainda são amplamente difundidas para usos industriais (MOBARAKI et al., 2018).

Tendo em vista a ausência de estudos dedicados ao melhor entendimento dos processos de secagem de lodos de ETE's, bem como dedicados à exploração de novas metodologias de secagem, o presente trabalho busca contribuir para este segmento, abordando a caracterização e a secagem de lodos provenientes de ETE's de uma indústria metal mecânica localizada em Charqueadas, Rio Grande do Sul. Os lodos utilizados no estudo são classificados como resíduo não perigoso, de acordo com a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004), a qual dispõe sobre diretrizes para classificação de resíduos sólidos. A disposição desses resíduos é realizada de forma *on site*, que consiste no armazenamento de uma parte dos lodos no aterro de resíduos industriais perigosos (ARIPE), e também de forma *off site*, com a destinação dos resíduos para compostagem ou coprocessamento, de acordo com o tipo de lodo

A caracterização busca investigar as principais propriedades físicas e químicas do material e, além da caracterização, o estudo busca abordar metodologias redução de umidade e secagem dos lodos, visando à redução de massa a ser disposta e, conseqüentemente, redução de custos associados ao transporte e disposição dos resíduos pela empresa, cujas principais atividades realizadas pela empresa envolvem os processos de tratamento de metais como a usinagem, o forjamento (a morno) e a fosfatização.

| MATERIAIS E MÉTODOS |

Amostras

Para realização do presente estudo, foram utilizadas amostras de lodos provenientes de estações de tratamento de efluentes (ETE's) de uma empresa do setor metal mecânico, localizada no município de Charqueadas, Rio Grande do Sul. A Figura 5 apresenta a localização do município de



Charqueadas, em relação à capital Porto Alegre, além de apresentar a localização dos municípios de Montenegro e Nova Santa Rita, onde estão localizadas as usinas de coprocessamento e compostagem, respectivamente, para onde são atualmente encaminhados os lodos das ETE's da empresa de estudo.

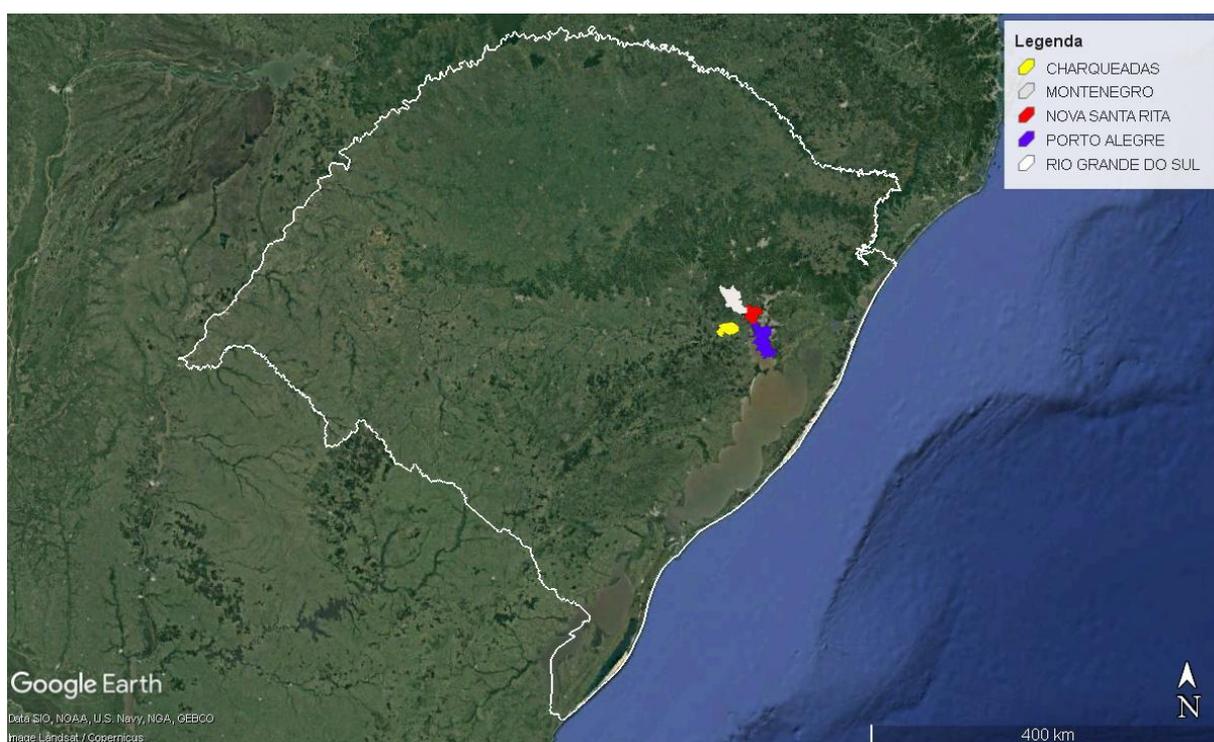


Figura 5: Localização do município de Charqueadas em relação ao território do estado do Rio Grande do Sul
Fonte: Adaptado do Google Earth (2020)

Os lodos são provenientes dos processos de tratamento dos seguintes efluentes de operações da empresa: efluentes de usinagem, efluentes de forjaria e efluente *die cleaning*, que corresponde ao efluente gerado durante as operações de lavagem de peças. Foram utilizados três tipos de lodo, sendo eles denominados “lodo usinagem”, “lodo misto” e “lodo *die cleaning*”, sendo que o lodo misto corresponde ao lodo proveniente da mistura dos efluentes de forjaria e usinagem, que ocorre durante a etapa de decantação dos lodos úmidos. O estudo foi realizado com foco na caracterização dos lodos e na problemática relacionada ao desaguamento e secagem dos lodos, conforme etapas descritas a seguir.

Os lodos de interesse foram previamente armazenados em tonéis metálicos, conforme sua produção na respectiva estação de tratamento de fluentes, na saída do filtro prensa de cada ETE. Para a coleta das amostras de lodo para a caracterização dos materiais, foi realizado o tombamento dos tonéis e posterior homogeneização dos lodos, a fim de garantir a representatividade das amostras e, por fim, as amostras de lodo foram coletadas e armazenadas em sacos plásticos transparentes,



devidamente vedados e identificados. A Figura 26 apresenta imagens das etapas realizadas para a coleta das amostras.



Figura 26: Etapas da amostragem. (a) Armazenamento dos lodos em tonéis metálicos após filtro prensa; (b) Preparo para homogeneização e coleta de amostras de lodo; (c) Amostras de lodo coletadas, armazenadas e identificadas

Caracterização físico-química dos lodos

Em laboratório, foi realizada a caracterização físico-química dos lodos, a fim de melhor compreender o comportamento dos resíduos. Inicialmente, as amostras de lodo foram submetidas a análises gravimétricas para a determinação do teor de umidade dos lodos, em base úmida, conforme metodologia descrita no anexo da NBR 6457 (ABNT, 1986) e determinada a partir da Equação 1, após a estabilização da massa das alíquotas mantidas em estufa a 600 °C.

$$h = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Sendo que:

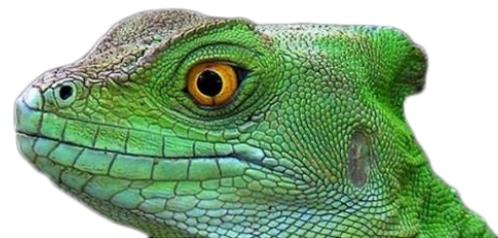
h corresponde ao teor de umidade, em base úmida do lodo, em %;

M_1 corresponde à massa de lodo úmido mais a massa do recipiente com tampa, em g;

M_2 corresponde à massa de lodo seco mais a massa do recipiente com tampa, em g;

M_3 corresponde à massa do recipiente com tampa, em g.

Outros processos térmicos foram utilizados para a caracterização físico-química das amostras de lodo, como, a determinação do teor de cinzas e determinação da perda ao fogo. Para a determinação do teor de cinzas dos lodos, em base úmida, foi utilizada a metodologia descrita na NBR 8289 (ABNT, 1983), na qual a determinação do teor de cinzas (Cz %) ocorre por meio da



proporção mássica de material que permanece nos cadinhos de porcelana após a combustão a 850,0 °C em forno do tipo mufla e conforme a Equação 2 a seguir.

$$C_z = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

Sendo que:

C_z corresponde ao teor de cinzas, em base úmida, em %;

m_1 corresponde à massa da amostra, em g;

m_2 corresponde à massa do resíduo após a queima, em g.

A perda ao fogo (P_f %) foi determinada pela massa perdida pelo processo de aquecimento das amostras, conforme a Equação 3.

$$P_f = 100 - C_z \quad \text{Equação 3}$$

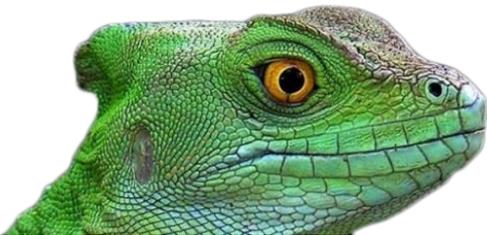
Sendo que:

P_f corresponde à perda ao fogo, em %.

Demais análises, como a difratometria de raios-X (DRX), espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) e análise termogravimétrica (TGA) das amostras dos lodos foram realizados em laboratórios da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, após o devido preparo. A análise DRX foi realizada em difratômetro de raios-X da marca Siemens (BRUKER AXS), modelo D-5000 (θ -2 θ) equipado com tubo de ânodo fixo de cobre ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), operando a 40 kV e 25 mA no feixe primário e monocromador curvado de grafite no feixe secundário.

A análise FRX permite a identificação de elementos químicos ($Z > 10$) presentes em uma amostra, além de estabelecer a proporção em que cada elemento se encontra presente na amostra, e foi realizada utilizando o foi realizada em espectrômetro de fluorescência de raios-X WDS, equipado com tubos de raios-X de ródio (Rh), modelo RIX 2000 da marca Rigaku.

Por fim, a análise TGA realizada permite a identificação do intervalo térmico no qual ocorre a combustão e conseqüente perda de massa associada à decomposição do material. O equipamento utilizado para a análise foi o SDT Q600, sob atmosfera inerte (gás N₂ com vazão de 100,0 mL/min), taxa de aquecimento de 20,0 °C/min e intervalo de temperatura de 20,0 a 1000,0 °C. Além da TGA, esta análise fornece a curva DTG que corresponde à derivada da curva de perda de massa em função da temperatura (dm/dt), que pode ser usada para identificar a T_i e T_f , que correspondem às



temperaturas inicial e final, respectivamente, da variação de massa. Além disso, com a DTG é possível determinar em quantas etapas ocorre uma decomposição térmica ou degradação térmica-oxidativa.

Estudos de secagem dos lodos

Com a obtenção dos primeiros resultados a respeito da caracterização físico-química, foi observado que todas as amostras de lodo (*die cleaning*, misto e usinagem) apresentavam teor de umidade total acima de 50,0%. Diante disso, foram abordadas técnicas para a redução de umidade dos resíduos, aplicando-se, em laboratório, a abordagem de secagem por pilhas ou empilhamento (*“dry stacking”*) muito empregada para redução de umidade de minérios e rejeitos da mineração (STICKLAND et al., 2013).

O procedimento de secagem dos lodos por pilhas envolveu a utilização de massa de 2,0 kg de cada tipo de lodo (lodo *die cleaning*, lodo misto e lodo usinagem), que foram dispostos em formato de pilha retangular sobre bandejas metálicas com camada de britas e papel filtro, que permitiam a percolação da umidade dos lodos para o fundo das bandejas (conforme demonstrado na Figura). Foram montadas três pilhas iguais para cada tipo de lodo, totalizando nove pilhas, as quais ficaram dispostas em área externa do laboratório, ao abrigo da chuva, porém expostas às condições do ambiente. O período de exposição das pilhas foi de quatro semanas (de 26/08/2019 a 27/09/2019) e a eficiência de secagem dos lodos foi avaliada por meio da comparação entre os teores de umidade inicial e final dos lodos, expressa em termos da redução da umidade após o período de exposição das pilhas. A Figura expõe as pilhas formadas para o lodo misto, que foram montadas de forma semelhante para os demais lodos estudados (lodo *die cleaning* e lodo usinagem).



Figura 3: Etapas do procedimento de preparo das bandejas para recebimento dos lodos

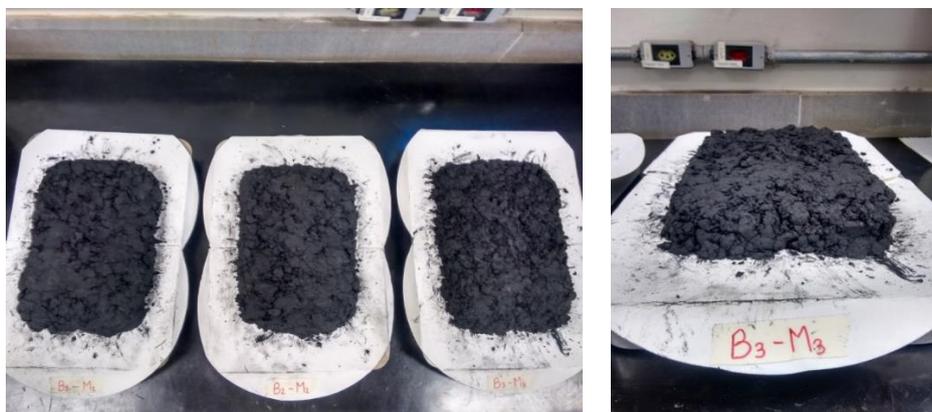


Figura 4: Vista superior das pilhas de lodo misto (esq.); Vista em detalhe da lateral de uma das pilhas de lodo misto (dir.)

A fim de melhor compreender e avaliar o comportamento da secagem dos lodos na empresa de estudo, foi iniciada uma etapa de secagem dos lodos em pontos estratégicos no interior da empresa, sendo eles a estação de tratamento de efluentes (ETE), galpão de resíduos sólidos e o aterro de resíduos industriais perigosos (ARIPE) da empresa. Os três locais foram escolhidos para a realização do experimento uma vez que estão associados ao gerenciamento dos lodos e resíduos sólidos da empresa. O experimento buscou avaliar qual o melhor local já utilizado pela empresa para a redução de umidade dos lodos.

Foram utilizados os lodos *die cleaning* e lodo misto, cerca de 35,0 kg de cada tipo de lodo, os quais foram armazenados em tonéis metálicos (os mesmos utilizados para o transporte dos lodos até o local de descarte da empresa), previamente limpos e com massa conhecida. Após receberem os lodos, os tonéis foram novamente pesados e dispostos nos locais de interesse durante o período de 72 dias (29/10/2019 a 10/01/2020). O lodo usinagem não foi avaliado neste ensaio devido a dificuldades de manuseio e locomoção do material no interior da empresa. Os lodos *die cleaning* e usinagem utilizados neste experimento encontravam-se nos locais de interesse para o estudo, sendo então realizada uma etapa de verificação do teor de umidade inicial de cada lodo oriundo de cada local. A avaliação do local mais favorável para a secagem dos lodos foi feita a partir da evolução da redução de massa dos tonéis de lodo.

Ao logo dos ensaios de secagem dos lodos, tanto em laboratório como na empresa de estudo, foram obtidos dados meteorológicos, como temperatura diária (máxima, média e mínima) e umidade relativa do ar (máxima, média e mínima) dos locais onde os lodos estavam dispostos. Para os ensaios realizados em laboratório, os dados meteorológicos foram obtidos por meio de consultas aos dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o município de Porto Alegre, durante o período de exposição dos lodos.

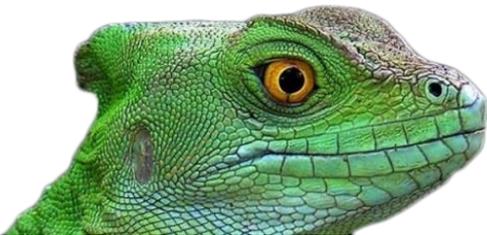


Figura 5: Tonéis metálicos utilizados para armazenamento dos lodos durante o período de 72 dias (29/10/2019 a 10/01/2020) de secagem dos lodos em diferentes ambientes da empresa

Para os ensaios de secagem realizados na empresa, foram instalados sensores de temperatura e umidade relativa do ar, sendo um deles instalado na ETE (Sensor 1), outro instalado no interior do galpão de armazenamento dos resíduos sólidos (Sensor 2) e, por fim, um localizado no interior do ARIPE da empresa (Sensor 3). Os sensores utilizados são da marca OMEGA, modelo OM-HL-SP, com armazenamento dos dados medidos.

Com base nos resultados de massa inicial e massa final dos lodos, foi possível determinar a taxa de secagem dos lodos em cada um dos ambientes de secagem, expressa em g de água perdida/kg de lodo úmido.dia, conforme a Equação 4 a seguir.

$$\text{Taxa de secagem} = \frac{\text{massa de água perdida}}{\text{massa inicial de lodo úmido} \times \text{dia}} \quad \text{Equação 4}$$

Sendo que:

- massa de água perdida corresponde à diferença de massa entre as pesagens, em g;
- massa inicial de lodo úmido corresponde à massa de lodo inicial, em kg.

| RESULTADOS E DISCUSSÃO |

Em relação à etapa de caracterização dos lodos, os resultados das análises por difração de raios X realizadas nas três amostras de lodos apresentaram difratogramas com elevada fluorescência, típico de materiais com elevado teor de ferro analisados com radiação de cobre, além de todas as



amostras de lodo apontarem a presença de magnetita (Fe_3O_4) e quartzo (SiO_2). A Tabela 9 apresenta os principais resultados das fases cristalinas identificadas nas análises de difração por raios X (DRX) para os lodos *die cleaning*, misto e usinagem.

A presença da sílica pode estar relacionada à mistura dos efluentes com as águas de lavagem dos pisos onde ocorrem os processos produtivos, e a presença de óxidos de ferro está, provavelmente, associada às partículas de ferro que se desprendem das peças, matrizes e até mesmo das prensas (THIESEN, 2018). Demais compostos identificados na análise estão relacionados, provavelmente, aos processos de tratamento dos efluentes, como a calcita (CaCO_3) presente devido à adição de cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e a thenardita (Na_2SO_4), que pode estar relacionada à adição de ácido sulfúrico (H_2SO_4) e hidróxido de sódio (NaOH).

Tabela 9: Fases cristalinas identificadas nos resultados de difração por raios X (DRX) para amostras dos lodos *die cleaning*, misto e usinagem.

Lodo <i>die cleaning</i>		Lodo misto		Lodo usinagem	
Fase	Ficha Cristalográfica	Fase	Ficha Cristalográfica	Fase	Ficha Cristalográfica
Calcita (CaCO_3)	01-072-1937	Magnetita (Fe_3O_4)	01-085-1780	Magnetita (Fe_3O_4)	01-089-0691
Magnetita (Fe_3O_4)	01-074-1910	Quartzo (SiO_2)	01-089-0688	Quartzo (SiO_2)	01-089-8937
Quartzo (SiO_2)	01-089-8940			Thenardita (Na_2SO_4)	01-074-2036

Os resultados da análise elementar semiquantitativa conduzida por fluorescência de raios X é apresentada na Tabela , que apresenta, também, a informação de perda ao fogo das amostras, identificada por LOI. A respeito dos resultados dessa análise, percebe-se a ocorrência de alumínio nas três amostras de lodo, possivelmente devido ao uso de cloreto de polialumínio (PAC) como reagente do tratamento dos efluentes. As amostras de lodo misto e lodo usinagem apresentaram percentuais significativos de ferro (Fe), possivelmente devido aos processos produtivos, como mencionado anteriormente. Devido às quantidades significativas de ferro nas amostras de lodos, cabe ressaltar o potencial de recuperação deste metal e possibilidades de reaproveitamento, tais como: utilização de lodo rico em ferro para melhoria da eficiência de remoção de fósforo em estações de tratamento de efluentes, aplicação do lodo em cultivos de espécies cítricas e recuperação do ferro como coagulante (TSUTIYA e HIRATA, 2001). Nesse sentido, também cabe ressaltar o potencial para



a recuperação do alumínio presente nos lodos. Barros e de Oliveira (2012) propuseram a recuperação de alumínio presente em lodo de estação de tratamento de água (ETA) como sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3$), que é utilizado como coagulante nos processos de tratamento de água e efluentes.

Os resultados a respeito do teor de umidade dos lodos *in natura*, realizados de acordo com as recomendações da norma NBR 6457 (ABNT, 1986) são apresentados na Tabela a seguir. Analisando os resultados da Tabela, percebe-se que os lodos apresentaram valores de umidade elevados, especialmente o lodo misto, com umidade média de 70,5%. Os resultados encontram-se acima dos valores citados em literatura para filtros prensa, que costumam ficar na ordem de 25 a 50% (ANDREOLI, 2001; CAVALCANTI, 2012.), indicando a necessidade de adoção de outras medidas para redução de umidade, uma vez que o transporte e a disposição dos lodos leva em consideração a massa do material.

Tabela 2: Resultados da análise semiquantitativa por fluorescência de raios X, em porcentagem em massa, das amostras de lodo *die cleaning*, misto e usinagem.

Elemento (%, m/m)	s'	Amostra		
		Lodo <i>die cleaning</i>	Lodo misto	Lodo usinagem
Si	0,17	nd	nd	nd
Al	0,16	17,03	7,15	5,84
Ti	0,00	0,23	0,16	0,04
Fe	0,03	2,57	25,09	22,37
Mn	0,00	0,03	0,11	0,07
Mg	0,03	16,5	4,08	0,79
Ca	0,01	5,90	1,54	0,29
Na	0,08	0,24	4,40	12,13
K	0,02	0,07	0,14	0,22
P	0,01	0,55	2,87	6,84
LOI* (%)		56,86	54,45	51,41
Total		99,98	99,99	100

*LOI corresponde à perda ao fogo observada durante a análise



Tabela 3: Valores de teores de umidade média e desvio padrão para as amostras de lodo analisadas (n=3).

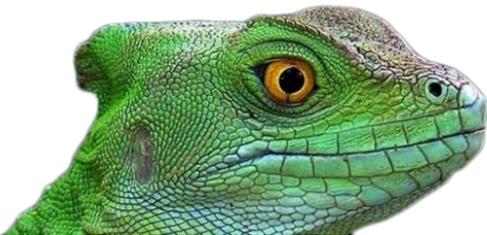
Tipo de lodo	Umidade média (%)	Desvio padrão
<i>Die cleaning</i>	63,3	0,9
Misto	70,5	0,2
Usinagem	54,4	3,1

A Tabela apresenta os resultados obtidos para o teor de cinzas e perda ao fogo dos lodos, obtidos de acordo com a NBR 8289 (ABNT, 1983). Os resultados indicam que, com um tratamento térmico a 850 °C, além da redução da umidade, ocorre a possibilidade de uma redução em massa de aproximadamente 45% para o lodo *die cleaning*, 42% para o lodo misto e 59% para o lodo de usinagem por decomposição térmica do resíduo seco.

Tabela 4: Resultados de teor de cinzas médio (Cz) e perda ao fogo média (Pf) para os lodos *die cleaning*, misto e usinagem (n=3).

Tipo de lodo	Teor de cinzas médio - Cz (%)	Perda ao fogo média - Pf (%)
<i>Die cleaning</i>	55,3	44,7
Misto	58,3	41,7
Usinagem	46,2	58,8

Os resultados das análises termogravimétricas (Figura) apresentam o comportamento dos lodos à medida que a temperatura a qual está exposto aumenta, em relação à sua perda de massa (TGA) além de apresentarem os resultados para a derivada da curva TGA, a curva DTG, a qual representa a velocidade com que a decomposição térmica acontece. Analisando os resultados, é possível observar que os três tipos de lodo apresentaram perda de massa entre 50 e 60,0%, com decomposição térmica significativa até 850,0 °C. Analisando a curva TGA para a amostra de lodo *die cleaning*, observa-se que os picos de reação em função da temperatura mais significativos ocorreram em temperaturas próximas a 150, 240 e 700,0 °C, sendo que a temperatura de reatividade máxima ocorreu em temperatura próxima de 250,0 °C. Em relação à curva TGA para a amostra de lodo misto, percebe-se que a temperatura de reatividade máxima ocorre a aproximadamente 290,0 °C e que a curva DTG apresentou picos em temperaturas próximas de 290 e 430,0 °C, sendo que o segundo pico sugere que se refere a uma reação secundária de decomposição. Para a amostra de lodo usinagem,



são observados vários picos da curva DTG, sendo que o principal ocorre a aproximadamente 301,0 °C e após o último pico próximo a 660,0 °C, é observado um decaimento da curva DTG e ausência de picos significativos, indicando a ocorrência de reações pequenas de decomposição térmica.

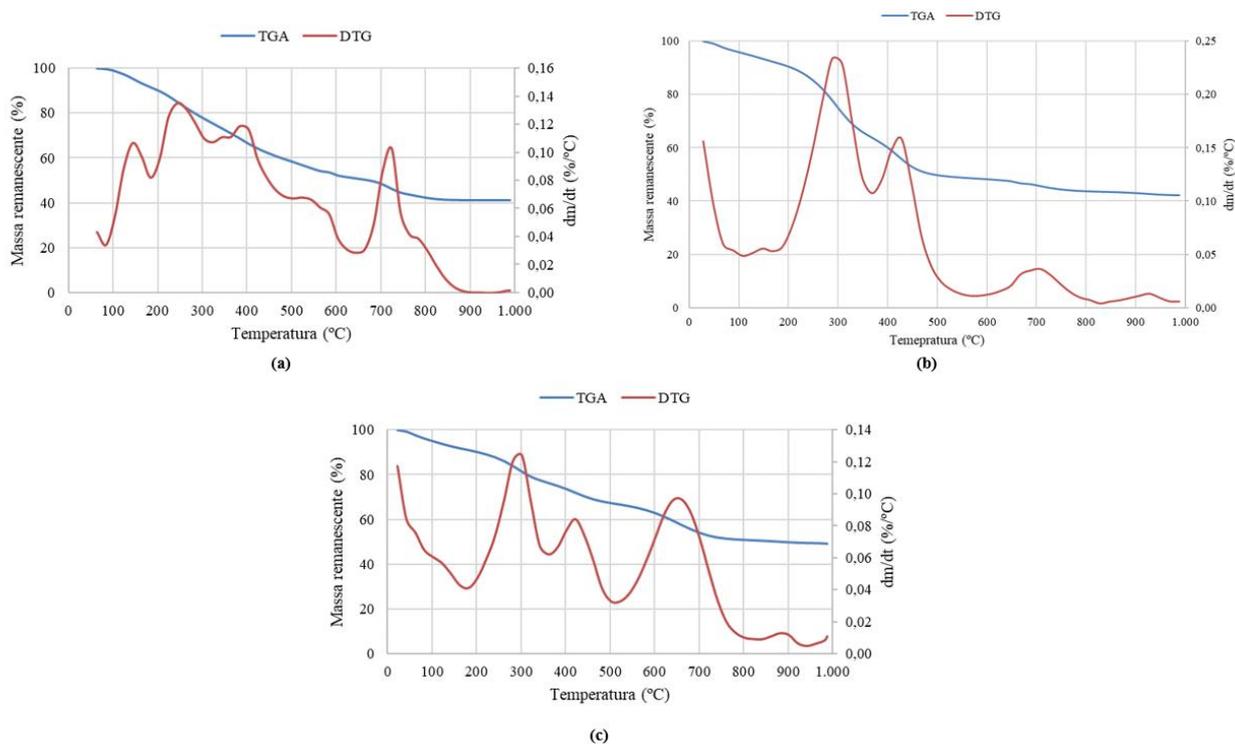
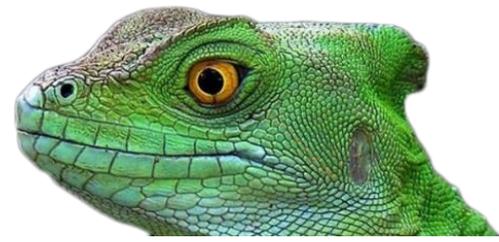


Figura 6: Resultados das análises termogravimétrica para as amostras de lodos die cleaning (a), misto (b) e usinagem (c)

A respeito do ensaio de secagem em pilhas realizado no laboratório, as pilhas após ficarem expostas por um período de quatro semanas (26/08/2019 a 27/09/2019), período durante o qual ocorre a mudança de estação (inverno – primavera) caracterizada por períodos chuvosos e de tempo ensolarado e estável, são apresentadas na Figura abaixo. Na Figura é possível perceber que os três tipos de lodo apresentavam, visualmente, aspecto de lodo mais seco do que na condição inicial, indicando que o período de tempo em que ficaram expostos na área externa, bem como a superfície drenante na qual estavam dispostos, contribuiu positivamente para a redução de umidade dos materiais.

Ao final do período de exposição, amostras de lodos das pilhas foram coletadas para análise gravimétrica do teor de umidade de cada tipo de lodo, e os teores de umidade finais foram comparados aos teores de umidade iniciais a fim de determinar a redução de umidade. Os resultados são apresentados na Figura a seguir, na qual é possível observar que a redução de umidade foi bem significativa para os três tipos de lodo estudados, sendo que a redução de umidade para os lodos *die*



cleaning, misto e usinagem foram, respectivamente, 41,3%, 49,5% e 34,6%. Com base nas informações de massa inicial e massa final dos lodos, após o período de quatro semanas, também foram obtidas as taxas de secagem para cada tipo de lodo, que foram de 18,3 g H₂O/kg de lodo úmido.dia, 15,9 e 18,7 g H₂O/kg de lodo úmido.dia, para os lodos *die cleaning*, misto e usinagem, respectivamente.



Figura 7: Pilhas de lodos dispostas em área externa do laboratório antes do período de quatro semanas (a) e após o período de quatro semanas (b). Da esquerda para a direita: lodo *die cleaning*, lodo misto e lodo usinagem, em ambas as imagens.

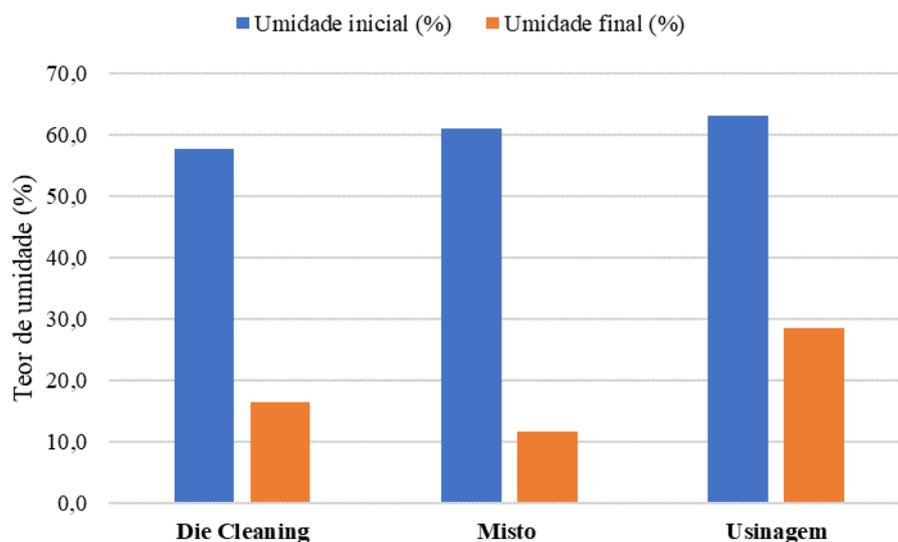


Figura 8: Resultados do ensaio de secagem dos lodos em área externa do laboratório após o período de quatro semanas

Em relação ao monitoramento das variáveis meteorológicas, o período de 26/08/2019 a 27/09/2019 foi caracterizado por variações significativas na temperatura e umidade relativa do ar,



conforme informações coletadas no banco de dados do INMET. A temperatura média para o período foi de 17,2 °C e a umidade média foi de 76,1%. Percebeu-se que os registros de temperaturas mais elevadas coincidiram com os registros de baixa umidade relativa do ar, favorecendo o processo de secagem do lodo. A temperatura máxima registrada no período foi de 36,1 °C e a mínima foi de 6,9°C. Durante o período, foi registrado um evento de precipitação de até 38,8 mm, que coincide a máxima umidade relativa do ar de 97,0%. Apesar das variações dos dados observados, a secagem do lodo ocorreu de forma satisfatória, mesmo com período chuvoso ou até baixas temperaturas.

Após o período de 72 dias (de 29/10/2019 a 10/01/2020), as amostras de lodo *die cleaning* e lodo misto que estiveram expostas na ETE, galpão de resíduos sólidos e ARIPE da empresa de estudo foram submetidas a análises gravimétricas para verificação da redução de umidade dos lodos. A Figura a seguir apresenta os principais resultados do experimento de secagem dos lodos no ambiente industrial. Em relação aos lodos dispostos em tonéis metálicos na área externa da ETE, o lodo *die cleaning* apresentava umidade inicial de 27,0% e o lodo misto apresentava umidade inicial de 54,4%. Ao final do período de 72 dias, as umidades finais foram de 12,6% e 29,8% para os lodos *die cleaning* e misto, respectivamente, e a taxa de secagem dos lodos sob essas condições foram de 2,3 e 4,8 g H₂O/kg de lodo úmido.dia para o lodo *die cleaning* e misto, respectivamente. Em relação aos lodos dispostos no galpão de resíduos sólidos, o lodo *die cleaning* apresentava umidade inicial de 47,1% e o lodo misto apresentava umidade inicial de 56,4%. Ao final do período de exposição de 72 dias, os lodos *die cleaning* e misto apresentaram umidade final de 34,5 e 44,6%, e taxa de secagem de 2,7 e 3,0 g H₂O/kg de lodo úmido.dia, respectivamente. Os lodos dispostos em tonéis metálicos no ARIPE apresentavam umidade inicial de 7,4 e 58,8%, para o lodo *die cleaning* e misto, respectivamente. Ao final do período de 72 dias, as umidades finais foram de 2,2 e 39,6%, e as taxas de secagem foram de 0,7 e 4,4 g H₂O/kg de lodo úmido.dia para o lodo *die cleaning* e misto, respectivamente.

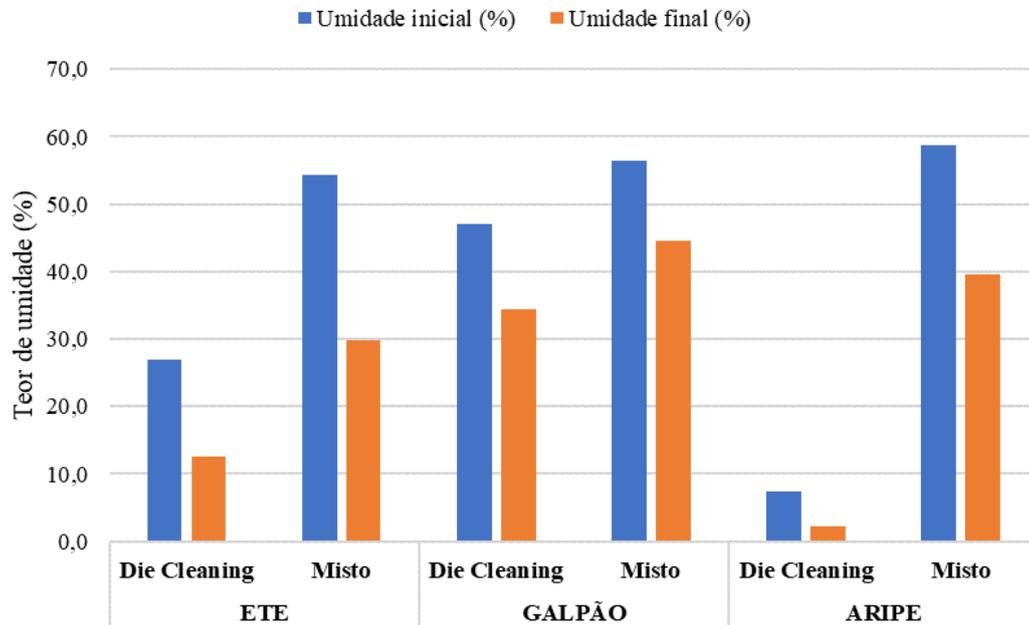
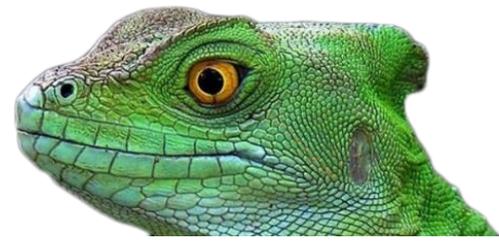


Figura 9: Resultados do ensaio de secagem dos lodos na empresa de estudo após o período de 72 dias

Em relação ao monitoramento das condições meteorológicas nos locais da empresa de estudo, a Tabela apresenta os principais resultados de temperatura máxima, temperatura média, temperatura mínima e umidade relativa do ar média para os locais de interesse durante o período de 72 dias de experimento. As maiores temperaturas observadas no galpão de resíduos e no ARIPE se devem, provavelmente, ao material metálico utilizado em suas estruturas, que aquece rapidamente e mantém o calor no interior das construções. No entanto, percebeu-se que apenas a temperatura elevada não resulta em maiores reduções de umidade dos lodos, conforme observado na Figura, uma vez que os lodos dispostos na ETE apresentaram resultados mais otimistas para a redução de umidade dos resíduos. Esse comportamento está relacionado, provavelmente, ao fato de os lodos estarem dispostos em área externa, protegidos de eventos de chuva, porém expostos à maior circulação de ar e, conseqüentemente, maior troca de calor com o ambiente. Esse motivo também justificaria a maior taxa de secagem dos lodos observadas em ensaios realizados no laboratório do que as taxas observadas no experimento conduzido na empresa, uma vez que no laboratório a disposição dos lodos em formato de pilhas retangulares proporcionou maior área superficial dos lodos quando comparados com os lodos dispostos em tonéis metálicos, como foi realizado na empresa.

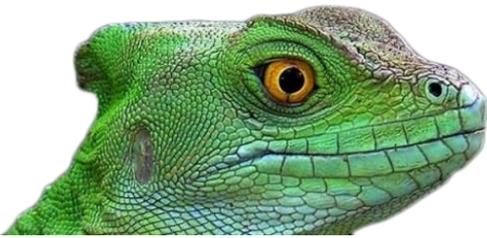


Tabela 5: Resumo dos parâmetros meteorológicos observados nos locais da empresa de estudo durante o período de 29/10/2019 a 10/01/2020.

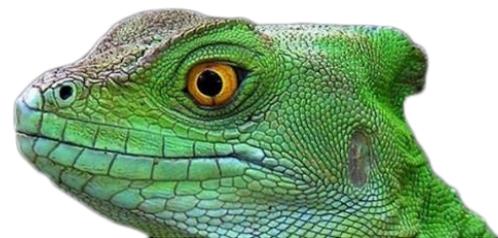
Local	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Média (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Umidade Relativa do Ar Média (%)
ETE	42,4	25,0	15,0	65,9
Galpão de resíduos sólidos	45,4	26,5	13,8	61,8
ARIPE	49,4	26,7	11,0	61,7

De acordo com informações obtidas junto à empresa, os valores praticados à época do presente estudo para a disposição dos resíduos para coprocessamento e compostagem são de R\$612,00/ton e R\$97,00/ton, respectivamente. Além disso, os valores associados ao transporte dos resíduos até a usina de coprocessamento e a central de compostagem são, respectivamente, R\$847,80/ton e R\$999,80/ton. A partir destas informações e das informações sobre a produção mensal de lodos na empresa de estudo, foi avaliada a redução de custo potencial considerando o teor de umidade final dos lodos na ordem de 35,0%, valor este atingido tanto nos experimentos de secagem no laboratório como na empresa de estudo. A Tabela apresenta a comparação de custos da empresa atuais e após a etapa de redução de umidade dos lodos, considerando umidade final de 35,0%.

Tabela 6: Comparação de custos com disposição anuais atuais e após secagem dos lodos, considerando umidade final de 35,0%.

Tipo de lodo	Geração (ton/mês)	Custo anual atual* (R\$/ano)	Geração após redução de umidade (ton/mês)	Custo anual após redução da umidade* (R\$/ano)
Lodo Die Cleaning	1,20	R\$ 21.021,12	0,55	R\$ 9.634,68
Lodo Usinagem	3,00	R\$ 39.484,80	1,93	R\$ 25.401,90
Lodo Forjaria	11,00	R\$ 192.693,60	5,46**	R\$ 95.646,10

Os valores apresentados na Tabela consideraram o valor gasto pela empresa para transporte e disposição do lodo de usinagem de R\$1.096,80/ton e R\$1.459,80/ton para os demais lodos e consideraram o teor de umidade do lodo misto para a simulação econômica aplicada ao lodo de forjaria. A partir dessa avaliação, é possível perceber que ocorre redução considerável nos custos de



transporte e disposição dos lodos após ocorrer a redução de umidade dos mesmos, e que pode chegar a uma redução de custos de até 48,4%, ou seja, quase 50% do valor atual. Com isso, fica evidente que a redução de umidade dos lodos garante uma redução de custos nas atividades associadas ao seu gerenciamento fora da empresa, além de mostrar que o investimento em pesquisa e novas tecnologias no setor pode ser economicamente viável.

| CONSIDERAÇÕES FINAIS |

A caracterização dos lodos permitiu a determinação de parâmetros dos materiais, sendo que o teor de umidade dos lodos foi o parâmetro mais importante durante a execução do trabalho, pois permitiu a busca por metodologias para redução de umidade, e consequentemente, redução de custos associados à disposição dos materiais. As análises de difratometria de raios X e espectrometria por fluorescência de raios X permitiram a determinação dos compostos cristalinos e análise quali e quantitativa dos lodos, possibilitando a determinação usos futuros de acordo com as características de cada resíduo. Com isso, algumas possibilidades de reutilização dos lodos para usos agrícolas, por exemplo, podem ser posteriormente estudadas, bem como a investigação sobre o potencial de recuperação de metais presentes nos resíduos e sua viabilidade, uma vez que as amostras de lodo apresentaram teores consideráveis de ferro e alumínio. Com base nas informações obtidas por meio das análises termogravimétricas, é possível estimar que ocorra perda de massa de 40 a 60% nos lodos, quando submetidos a tratamentos térmicos superiores a 850,0 °C. Tal informação é fundamental para a avaliação e tomada de decisão a respeito do melhor tratamento e disposição dos resíduos.

Os ensaios de secagem realizados no laboratório por meio de pilhas de lodos apresentaram resultados positivos na redução de umidade dos lodos, sendo depois realizados ensaios de secagem dos lodos no próprio ambiente industrial. Em laboratório, foi observado que a redução de umidade dos lodos *die cleaning*, misto e usinagem foram, respectivamente, 41,3%, 49,5% e 34,6%. Com base nas informações de massa inicial e massa final dos lodos, após o período de quatro semanas, também foram obtidas as taxas de secagem para cada tipo de lodo, que foram de 18,3 g H₂O/kg de lodo úmido.dia, 15,9 e 18,7 g H₂O/kg de lodo úmido.dia, para os lodos *die cleaning*, misto e usinagem, respectivamente. Os resultados mais satisfatórios ocorridos em laboratório podem estar relacionados ao fato de que, quando os lodos estão dispostos em formato de pilha, a mesma oferece melhores condições para a redução da umidade devido à maior área superficial dos lodos do que quando comparado à disposição dos resíduos em tonéis metálicos. Além disso, no experimento



realizado em laboratório, as pilhas de lodo ficaram dispostas em área externa, que, como verificado no experimento realizado na ETE da empresa de estudo, ofereceu melhores condições de redução de umidade dos lodos, possivelmente devido à maior circulação de ar nos locais externos.

Na empresa de estudo, foram avaliados os melhores locais para disposição e redução de umidade dos lodos *die cleaning* e misto. A maior redução de umidade foi observada na ETE, para o lodo misto, que foi de 24,6%. A partir dos resultados apresentados de secagem no ambiente da empresa de estudo, verificou-se a influência de outros fatores além da temperatura e umidade relativa do ar, que desempenharam papéis importantes para a redução de umidade dos lodos, como, por exemplo, a circulação de ar no local onde os lodos ficam dispostos para secagem. Com isso, foi observado que mesmo nos locais com temperaturas elevadas registradas, como no galpão de resíduos sólidos e ARIPE, onde as temperaturas atingiram quase 50,0 °C, os lodos ali dispostos não tiveram a melhor redução de umidade.

Por fim, a avaliação econômica realizada mostrou que é possível obter uma economia considerável com as atividades de transporte de disposição dos lodos caso sejam implantadas metodologias adequadas para redução de umidade dos resíduos. A redução de custos da empresa com as atividades de transporte e destinação adequada dos lodos pode chegar a quase 50% indicando que este setor apresenta potencial para realização de pesquisas e investimentos em tecnologias adequadas para permitir a redução de umidade dos resíduos.

O presente estudo possibilitou, portanto, o melhor entendimento do processo de geração de resíduos do tratamento de efluentes da empresa de estudo, bem como apresentou informações pertinentes ao processo de gerenciamento desses materiais. Além disso, apresentou metodologias para melhorar os processos de redução de umidade dos lodos, e apresentou informações relevantes ao processo de secagem e de lodos, como a taxa de secagem de lodos. Espera-se, portanto, que as informações contidas no presente trabalho possam auxiliar na gestão dos resíduos sólidos de ETE's industriais, seja no que tange às melhorias de redução de umidade de lodos, como ao potencial de reuso e reaproveitamento do material, conforme sua composição.

| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS |

Andreoli, C. V. 2001. Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 1983. NBR 8290: Carvão mineral – determinação do teor de cinzas. Rio de Janeiro.



- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 1986. NBR 6457: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 2004. NBR 10.004: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro.
- Barros, S.S.; de Oliveira, R. M. S.. 2012. Recuperação do alumínio utilizado na Estação de Tratamento de Água 6 (ETA 6) de Palmas-TO. 8º Seminário de Iniciação Científica da Universidade Federal do Tocantins. Palmas.
- Cavalcanti, J. E. W de A. 2012. Manual de tratamento de efluentes industriais. 2ª ed. 500p. São Paulo.
- Marson, M.D. 2014. A evolução da indústria de máquinas e equipamentos no Brasil: Dedini e Romi, entre 1920 e 1960. Nova Economia. n. 24, p. 685-710. Belo Horizonte.
- Mobaraki, M.; Semken, R. S; Mikkola, A.; Pyrhönen, J.. 2018. Enhanced sludge dewatering based on the application of high-power ultrasonic vibration. Ultrasonics. n. 84, p.438-445.
- Rio Grande do Sul. 2017. Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul. Secretaria de Planejamento, Orçamento e Gestão. Disponível em: <<https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/metalurgia-e-maquinas-e-equipamentos>>. Acesso em 17 de julho de 2019.
- Stickland, A. D.; Ress, C. A; Mosse, K. P. M; Dixon, D. R; Scales, P.J.. 2013. Dry stacking of wastewater treatment sludges. Water Research. n. 47, p. 3543-3542.
- Thiesen, R. F. T. 2018. Caracterização, processamento e aproveitamento energético de um lodo grafítico de uma estação de tratamentos de efluentes de forjaria. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Tsutiya, M. T.; Hirata, A. Y. 2001. Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. João Pessoa