

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Engenharias
Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária



Trabalho de Conclusão de Curso

**Uso de cinza de casca de arroz ativada como meio adsorvente para o processo
de pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário**

Josiane Pinheiro Farias

Pelotas, 2018

Josiane Pinheiro Farias

Uso de cinza de casca de arroz ativada como meio adsorvente para o processo de pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário

Trabalho acadêmico apresentado no curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Profº. Drº. Maurizio Silveira Quadro

Pelotas, 2018

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

F224u Farias, Josiane Pinheiro

Uso de cinza de casca de arroz ativada como meio adsorvente para o processo de pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário / Josiane Pinheiro Farias ; Maurizio Silveira Quadro, orientador. — Pelotas, 2018.

53 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) — Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, 2018.

1. Aproveitamento de resíduos agrícolas. I. Quadro, Maurizio Silveira, orient. II. Título.

CDD : 628

Josiane Pinheiro Farias

Uso de cinza de casca de arroz ativada como meio adsorvente para o processo de
pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado, como requisito parcial, para obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária, Centro de Engenharia
Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa:13/03/2018

Banca examinadora:

.....
Prof. Dr. Maurizio Silveira Quadro - Centro de Engenharias/UFPel - Orientador

.....
Prof. Dr. Érico Kunde Corrêa - Centro de Engenharias/UFPel

.....
Prof^a. Dr^a. Gizele Ingrid Gadotti, - Centro de Engenharias/UFPel

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, por ser protetor da dignidade e do amor que ele concede a homem.

A minha família. A minha mãe, Jaci Pinheiro Farias, pela motivação e pelo suporte dado em todos os momentos da graduação, ao meu pai, José Calos, onde ele estiver pelo o exemplo de como deve-se lutar pela vida. E ao meu irmão que gerou um membro muito especial da família Farias, meu sobrinho, que me proporcionou momentos de distração quando o cansaço dos estudos chegava.

Ao professor Maurizio Silveira Quadro, pela oportunidade de trabalharmos juntos durante a graduação e por compartilhar seu conhecimento. Agradeço a orientação, a paciência e compreensão concedida para realização deste trabalho.

À professora Luciara Corrêa, pela grande paciência e dedicação.

Aos colegas do Laboratório por estimular a busca por conhecimento. Em especial, Larissa, Mariana, Marcela, Carolina, Thays, Kelly.

À Universidade Federal de Pelotas, pela estrutura e auxílios que foram fundamentais para minha formação.

Às pessoas queridas, que de algum modo, contribuíram em determinado momento na minha graduação.

Resumo

FARIAS, Josiane Pinheiro. **Uso de cinza de casca de arroz ativada como meio adsorvente para o processo de pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário** 2018. 53f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

O modo de vida da sociedade vem contribuindo para o consumo dos recursos naturais, mas que retornam como resíduos causando impacto ambiental. Por isso, necessitam de adequado tratamento e disposição. Uma técnica mundialmente utilizada para a disposição é o aterro sanitário. Porém no processo de degradação da matéria orgânica é produzido um líquido de coloração escura de alto potencial poluente, pois contém elevada carga orgânica, e metais pesados sendo necessário tratamento adequado antes de seu lançamento nos copos de água. Usualmente o lixiviado é tratado por processos biológicos anaeróbios ou aeróbios, mas não atingem os parâmetros de lançamento exigidos pela legislação vigente, necessitando de tratamento complementar. O carvão ativado produzido a partir de resíduos agrícolas, cinza de casca de arroz (CCA), surge como alternativa para o tratamento, principalmente para a redução de cor. O processo de tratamento com carvão, pode ser realizado em sistemas: em batelada ou em coluna de leito fixo. Este trabalho determinou a melhor condição operacional para o tratamento de chorume utilizando uma coluna de leito fixo. A coluna foi preenchida com CCA ativada e material suporte (areia). As alturas de coluna estudadas foram 5cm e 20 cm de adsorvente. A coluna que apresentou melhor eficiência tanto na remoção de carga orgânica (DQO) e cor foi o sistema que possui altura de 20cm de CCA e areia intercalada com a camada de carvão, apresentando eficiência de remoção de DQO de 88,91% e tempo ruptura de 120 min. A remoção de cor aparente foi de 87,40% com tempo de ruptura de 40 min e a remoção a cor verdadeira de 86,64 % com tempo de ruptura de 50 min. Os resultados obtidos com a cinética de adsorção em leito proposto por Thomas, apresentou uma fraca correlação com o conjunto de dados, devido ao modelo não prever a adsorção competitiva dos múltiplos componentes presentes no lixiviado de aterros sanitário. Porém, deve ser realizados mais estudos com variação de outros parâmetros para validar sua aplicação no tratamento do lixiviado.

Palavras-chave: Aproveitamento de resíduos agrícolas, leito de adsorção, lixiviado

Abstract

FARIAS, Josiane Pinheiro. **Use of ash from activated rice husks as an adsorbent for the post-treatment process of landfill leachate** 2018. 53f. Course Conclusion Paper (TCC). Graduation in Environmental and Sanitary Engineering. Federal University of Pelotas, Pelotas

The society lifestyle has been contributing to the exploration of natural resources that return as waste causing environmental impacts. Therefore, it is needed it's proper treatment and disposal. One worldwide used technique for disposal is the landfill. However, in the process of the organic matter degradation, a dark colored liquid of high pollutant potential is produced, because it contains high organic load, and heavy metals, being necessary to do a correct treatment before its disposal in the water bodies. Usually the leachate is treated by anaerobic or aerobic biological processes, but does not reach the parameters required by current legislation, requiring complementary treatment. Activated charcoal produced from agricultural residues, rice husk ash (RHA), appears as an alternative to treatment, mainly for the color reduction. The coal treatment process can be carried out in batch or fixed bed systems. This work determined the best operational condition for the treatment of slurry using a fixed bed column. The column was filled with activated RHA and support material (sand). The column heights studied were 5cm and 20cm of adsorbent. The column that presented the best efficiency both in the removal of organic load (QOD) and color was the system that has a height of 20 cm of RHA and sand interleaved with the coal layer, presenting a QOD removal efficiency of 88.91% and 120 min of rupture time. The apparent color removal was 87.40% with rupture time of 40 min and true color removal of 86.64% with rupture time of 50 min. The results obtained with the kinetics of bed adsorption proposed by Thomas presented a weak correlation with the data set, due to the model do not predict the competitive adsorption of the multiple components present in the sanitary landfills leachate. However, further studies should be carried out with variation of other parameters to validate its application in the leachate treatment.

Keywords: Utilization of agricultural residues, adsorption bed, leachate

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Principais fases de degradação dos resíduos sólidos urbanos no interior do aterro sanitário. | 19 |
| Figura 2 - Curvas de ruptura. | 25 |
| Figura 3 - Curva de Ruptura e ponto de breakhroug..... | 26 |
| Figura 4 - Vista Área do Aterro sanitário da Metade Sul/ Candiota, RS. | 29 |
| Figura 5 - Espectro do EDS para a Cinza de Casca de Arroz in natura. | 32 |
| Figura 6 - Espectro do EDS para o carvão ativado quimicamente com NaOH. | 33 |
| Figura 7 - colunas de adsorção (a) C1, (b) C2 | 34 |
| Figura 8 - Bomba controladora de vazão | 34 |
| Figura 9 - Curvas de ruptura para os ensaios C1 e C2 na remoção de matéria orgânica (DQO) | 37 |
| Figura 10 - Curvas de ruptura de remoção de cor aparente (C1a e C2a) e cor verdadeira (C1b e C2b). | 41 |
| Figura 11 - Remoção de cor do chorume pelo processo de adsorção com massa de carvão ativado de CCA do sistema C1..... | 42 |
| Figura 12 - Remoção de cor do chorume pelo processo de adsorção com massa de carvão ativado de CCA do sistema C2..... | 42 |
| Figura 13 - Curvas de Ruptura do modelo de Thomas: (a) C1- DQO, (b) C2 –DQO, (c) C1 Cor aparente, (d) C2 – cor aparente, (e) C1 – cor verdadeira, (f) C2 – cor verdadeira. | 44 |

Listas de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Principais elementos resultantes da degradação de alguns resíduos sólidos | 18 |
| Tabela 2 - Composição de lixiviados de Aterros Sanitário nos EUA em diferentes idades..... | 20 |
| Tabela 3 - Características dos lixiviados de aterros brasileiros..... | 21 |
| Tabela 4 - Caracterização do lixiviado | 30 |
| Tabela 5 - Resultados de Granulometria, umidade e massa específica para o carvão ativado de CCA. | 32 |
| Tabela 6 - Características dos ensaios C1, C2 para a remoção de DQO. | 38 |
| Tabela 7 - Características dos ensaios C1, C2 para a remoção de cor aparente | 40 |
| Tabela 8 - Características dos ensaios C1, C2 para a remoção de cor verdadeira .. | 41 |
| Tabela 9 - Parâmetros determinados pelo modelo Thomas..... | 43 |

Lista de Abreviaturas e Siglas

| | |
|--------------------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ABRELPE | Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais |
| C | Concentração do Adsorbato na Saída da Coluna no Tempo t |
| C ₀ | Concentração do Adsorbato na Alimentação |
| CAG | Carvão Ativado Granular |
| CAP | Carvão Ativado em Pó |
| CCA | Cinza de Casca de Arroz |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| CONSEMA | Conselho Estadual do Meio Ambiente |
| Cor _r | Intensidade de Cor no Tempo de Ruptura |
| Cor _s | Intensidade de Cor no Tempo de Saturação |
| DBO | Demanda Bioquímica de Oxigênio |
| DQO | Demanda Química de Oxigênio |
| DQO _r | Demanda Química de Oxigênio no Tempo de Ruptura |
| DQO _s | Demanda Química de Oxigênio no Tempo de Saturação |
| EDS | Espectrometria de Superfície |
| EUA | Estados Unidos da América |
| g.Cm ⁻³ | Massa Específica Aparente |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| C1 | Altura de Leito de 5cm |
| C2 | Altura de Leito de 20cm ⁻¹ |
| mg.g ⁻¹ | Capacidade de Adsorção em Miligrama por Grama |
| MEV | Microscopia Eletrônica de Varredura |

| | |
|----------------------|--|
| mg.L ⁻¹ | Miligramas por Litro |
| mL | Mililitro |
| mL.min ⁻¹ | Mililitro por Minuto |
| MMA | Ministério do Meio Ambiente |
| NBR | Norma Brasileira |
| NTK | Nitrogênio Kjeldahl Total |
| N-NH ₃ | Nitrogênio Amoniacal |
| PERS | Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul |
| pH | Potencial Hidrogeniônico |
| PNRS | Política Nacional de Resíduos Sólidos |
| PROSAB | Programa de Pesquisa em Saneamento Básico |
| Q | Vazão de Alimentação |
| q _r | Capacidade de Adsorção no Tempo de Ruptura |
| q _s | Capacidade de Adsorção no Tempo de Saturação |
| ReCESA | Rede de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental |
| RSU | Resíduos de Sólidos Urbanos |
| SST | Sólidos Suspensos Totais |
| ST | Sólidos Totais |
| t _r | Tempo de Ruptura |
| t _s | Tempo de Saturação |
| ZTM | Zona de Transferência de Massa |

Sumário

| | |
|--|----|
| 1 Introdução | 13 |
| 1.1 Objetivos | 15 |
| 1.1.1 Objetivo Geral | 15 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos | 15 |
| 2 Revisão Bibliográfica | 16 |
| 2.1 Resíduos Sólidos e seus Impactos | 16 |
| 2.2. Caracterização do Lixiviado | 17 |
| 2.3 Resíduos da Produção de Arroz | 21 |
| 2.4 Adsorção | 23 |
| 2.5 Materiais Adsorventes | 23 |
| 2.6 Adsorção em Leito Fixo | 24 |
| 2.6.1 Modelos Matemáticos para Adsorção em Leito Fixo | 27 |
| 3 Material e Métodos | 29 |
| 3.1 Lixiviado de Aterro Sanitário Utilizado | 29 |
| 3.2 Caracterização do Lixiviado | 30 |
| 3.3 Carvão Ativado Utilizado | 30 |
| 3.4 Caracterização dos Carvões Ativados Pulverizado | 31 |
| 3.5 Ensaios de Adsorção em Coluna de Leito Fixo | 33 |
| 3.6 Análise de Dados da Coluna de Leito Fixo | 35 |
| 4 Resultados e Discussão | 37 |
| 4.1 Curvas de Ruptura para o Processo de Remoção de DQO | 37 |
| 4.2 Curvas de ruptura para o processo de remoção de cor para os sistemas C1 e C2 | 39 |
| 4.3 Curvas de ruptura para o modelo de Thomas dos sistemas C1 e C2 | 43 |
| 5. Conclusão | 45 |
| Referencias | 46 |

1 Introdução

O acelerado processo de urbanização, os avanços tecnológicos e industriais, além de estimular a utilização irracional dos recursos naturais, intensificou a geração de resíduos sólidos, oferecendo grandes riscos à saúde humana e ao meio ambiente (JUNIOR; FREIRE, 2013).

Neste cenário, a adoção de medidas para o gerenciamento de resíduos sólidos é uma tarefa indispensável, e complexa ao cotidiano (ORLANDO, 2014). Por esse motivo foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) prevista na Lei 12.305 (BRASIL, 2010), a qual reúne o conjunto de instrumentos e diretrizes de apoio e incentivo à gestão adequada dos resíduos sólidos no país, com ênfase para a destinação final em aterros sanitários.

O aterro sanitário é uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) no solo sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais (ABNT, 1992). Porém, esta técnica não previne a formação de biogás e lixiviado, os quais necessitam de coleta e tratamento adequados para que não tragam prejuízos ao ambiente (MORAVIA, 2010).

O lixiviado, efluente de alto poder poluidor, apresenta pH elevado, alta concentração compostos orgânicos de difícil degradação, como por exemplo, as substâncias húmicas que conferem ao chorume coloração escura (CAMPOS, 2013; SOUTO, 2009). Devido às suas características, a definição de um tratamento adequado é um problema ainda não solucionado (NORONHA, 2015).

Os processos biológicos são os mais utilizados para o tratamento de lixiviados, correspondendo aos sistemas aeróbios (lodos ativados, lagoas aeradas, filtros biológicos), e anaeróbios (reator anaeróbio de fluxo ascendente, lagoas anaeróbias, filtro anaeróbio). Porém, os processos biológicos não são eficientes no tratamento dos lixiviados de aterros que apresentam grande quantidade de compostos recalcitrantes e/ou de compostos tóxicos aos microrganismos, o que demanda assim, a combinação de duas ou mais técnicas (BAYRAM, 2012).

Segundo Noronha (2015), o tratamento do lixiviado deve apresentar o menor custo possível de instalação e operação associado à elevada eficiência. Nesta perspectiva, o emprego de processos físico-químico como a adsorção por meio do emprego de carvão ativado é foco de vários estudos como pós- tratamento de

lixiviado na remoção de matéria orgânica recalcitrante e cor (AZIZ et al., 2012; KAMARUDDIN et al., 2015; KAWAHIGASHI et al., 2014).

Na busca de redução de custo no tratamento de efluentes, e ou lixiviado, tem se tornado comum o uso de adsorventes de baixo custo, provenientes de resíduos agrícolas e industriais (FONSECA et al., 2016). A casca de arroz é um dos maiores subprodutos agrícolas, não possui valor comercial e apresenta lenta biodegradação, comumente utilizada como fonte de energia para o processo produtivo do arroz parboilizado, ou geração de energia elétrica (HALBERSTADT et al., 2015; NASCIMENTO et al., 2015; SOUZA, 2011). Porém, a queima das cascas resulta em outro resíduo, cinzas da casca de arroz, tendo como principal composição, carbono (10 – 20%) e dióxido de silício (80-90%), características que possibilitam sua utilização como matéria prima para produção de carvão ativado, dentre outras aplicações (MARCKMANN, 2016; PODE, 2016). Apesar de uma variedade de aplicação as cinzas de casca de arroz (CCA), têm como principal destino o descarte em solo agrícola e margens de rodovias e aterros (BERWANGER FILHO, 2014) gerando assim problemas ambientais e risco a saúde.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o uso de cinza de casca de arroz ativada, como meio adsorvente em sistema dinâmico para o processo de pós-tratamento de lixiviados do aterro sanitário da cidade de Candiota/RS.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o uso de cinza de casca de arroz ativada, como meio adsorvente em sistema dinâmico para o processo de pós-tratamento de lixiviados do aterro sanitário da cidade de Candiota/RS

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o comprimento de leito sobre as eficiências de remoção;
- Determinar as curvas de ruptura dos diferentes comprimentos de leito;
- Determinar ponto de saturação e *breakhroug*;
- Avaliar a eficiência de remoção de cor e matéria orgânica;
- Avaliar a condição operacional ideal para o processo de adsorção em leito fixo com carvão ativo de cinza de casca de arroz;

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Resíduos Sólidos e seus Impactos

Os resíduos sólidos são materiais no estado sólido ou semi-sólido, resultantes das atividades humanas em sociedade. Deste modo aqueles resíduos provenientes das atividades domésticas e serviços de varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana denominados de resíduos sólidos urbanos (RSU) (PNRS, 2010).

Os RSU constituem uma forte fonte de poluição, pois seu descarte inadequado causam problemas ao meio ambiente, decorrentes da decomposição da matéria orgânica, no qual geram líquidos (chorume), odores e gases, poluindo a água, solo e ar. Além disso, pode provocar o assoreamento de rios, obstruções de canais de drenagem urbana e redes de esgotamento sanitário e possibilitar a proliferação de vetores transmissores de enfermidades, e ainda provocar a desvalorização imobiliária das áreas próximas aos locais de disposição de resíduos (ANDRADE, 2011; BACELAR, 2010).

Assim, seu correto gerenciamento é de suma importância na preservação do meio ambiente e na segurança à saúde pública. Porém, a adoção de medidas para o gerenciamento do sistema de RSU é um grande desafio, devido a sua quantidade (no ano de 2017 foram coletados em torno de 214.405 toneladas por dia) e sua variação gravimétrica (matéria orgânica, papel/papelão, plástico, vidro, metais dentre outros) (CASSINI, 2003; ABRELPE, 2017; LIMA et al., 2017).

Para regular a tomada de decisões do gerenciamento dos resíduos sólidos foi instituído a Política Nacional de Resíduos sólidos que preconiza os seguintes passos para gestão, os quais correspondem a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, e caso não exista possibilidade de reaproveitamento, considera-se a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

E ainda segundo PNRS (2010), o processo recomendado para a disposição adequada dos resíduos sólidos urbanos é o aterro sanitário. O aterro sanitário pode ser considerado um reator dinâmico, porquanto, produzem através de reações

químicas e biológicas, emissões como o biogás, e o lixiviados a partir da decomposição da matéria orgânica (ELK, 2007).

Portanto, caso exista problemas de construção e operação dos aterros sanitários podem acarretar na poluição do solo, águas superficiais e subterrâneas. Logo, loca-lo em uma área adequada e definir a técnica de operação, principalmente os que se referem ao lixiviados e biogás, os quais necessitam ser drenados, coletados e tratados de forma adequada (SOUZA, 2014).

2.2. Caracterização do Lixiviado

O lixiviado ou chorume é resultado da interação entre os processos de biodegradação da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos e da infiltração de águas pluviais que solubilizam componentes orgânicos e inorgânicos. Como resultado formam-se os lixiviados, de cor escura, forte odor e com elevada carga orgânica (LAUERMANN, 2007)

A geração do lixiviado pode ser influenciado por diversos fatores como: precipitação pluviométrica, evapotranspiração, escoamento superficial, recirculação do lixiviado, umidade do RSU, vegetação, declividade, composição gravimétrica dos RSU, compactação, permeabilidade, granulometria e pela eficiência de impermeabilização de base (GOMES, 2009).

A estimativa quantitativa de lixiviado gerado é importante para o dimensionamento dos sistemas de drenagem, armazenamento e tratamento de efluentes em um aterro sanitário. Portanto, os métodos mais empregados são o método do balanço hídrico e o método suíço (BACELAR, 2010; JUNIOR, 2003). Além disto, a compreensão do fluxo de umidade no aterro é particularmente importante para a avaliação da degradação dos resíduos e produção de biogás (MORAVIA, 2010). As reações biológicas de decomposição da matéria orgânica da fração sólida é dependente da umidade, que deve existir em quantidade suficiente que permita uma atividade microbiana satisfatória (ELK, 2007). Na tabela 1, estão apresentados alguns tipos de resíduos sólidos depositados nos aterros sanitários de RSU e alguns dos elementos resultantes da sua decomposição.

Tabela 1 - Principais elementos resultantes da degradação de alguns resíduos sólidos

| | Elementos gerados |
|---------------------------|---|
| Madeira | Ácidos orgânicos, aldeídos, azoto amoniacal, cetonas, dióxido de carbono, fenol, nitratos, nitritos, etc. |
| Materiais vegetais | Ácidos orgânicos, aldeídos, azoto amoniacal, carbonatos, cetonas, dióxido de carbono, fenol, fosfatos, nitratos, nitritos, sulfatos, etc. |
| Metais | Bicarbonatos de ferro, cálcio ou magnésio, dióxido de carbono, óxidos de cobre, estanho ou zinco (em meio ácido), sulfatos de cálcio ou magnésio, chumbo, alumínio, cádmio, et. |
| Papel | Ácidos orgânicos, aldeídos, azoto amoniacal, dióxido de carbono, fenol, nitratos, nitritos, etc. |
| Têxteis | Ácidos orgânicos, aldeídos, azoto amoniacal, cetonas, dióxido de carbono, fosfatos, nitratos, nitritos, sulfatos, etc. |

Fonte Levy, J.Q. & Cabeças, A.J. (2006) *apud* Costa, (2015).

Os resíduos biodegradáveis são decompostos gradualmente em compostos menos complexos por vários grupos de bactérias, pelo meio de processos aeróbio e anaeróbio. Segundo Environmental Protection Agency (2000), os principais componentes orgânicos existentes no lixiviado de aterro são formados por sucessivos processos, descritos na figura 1.

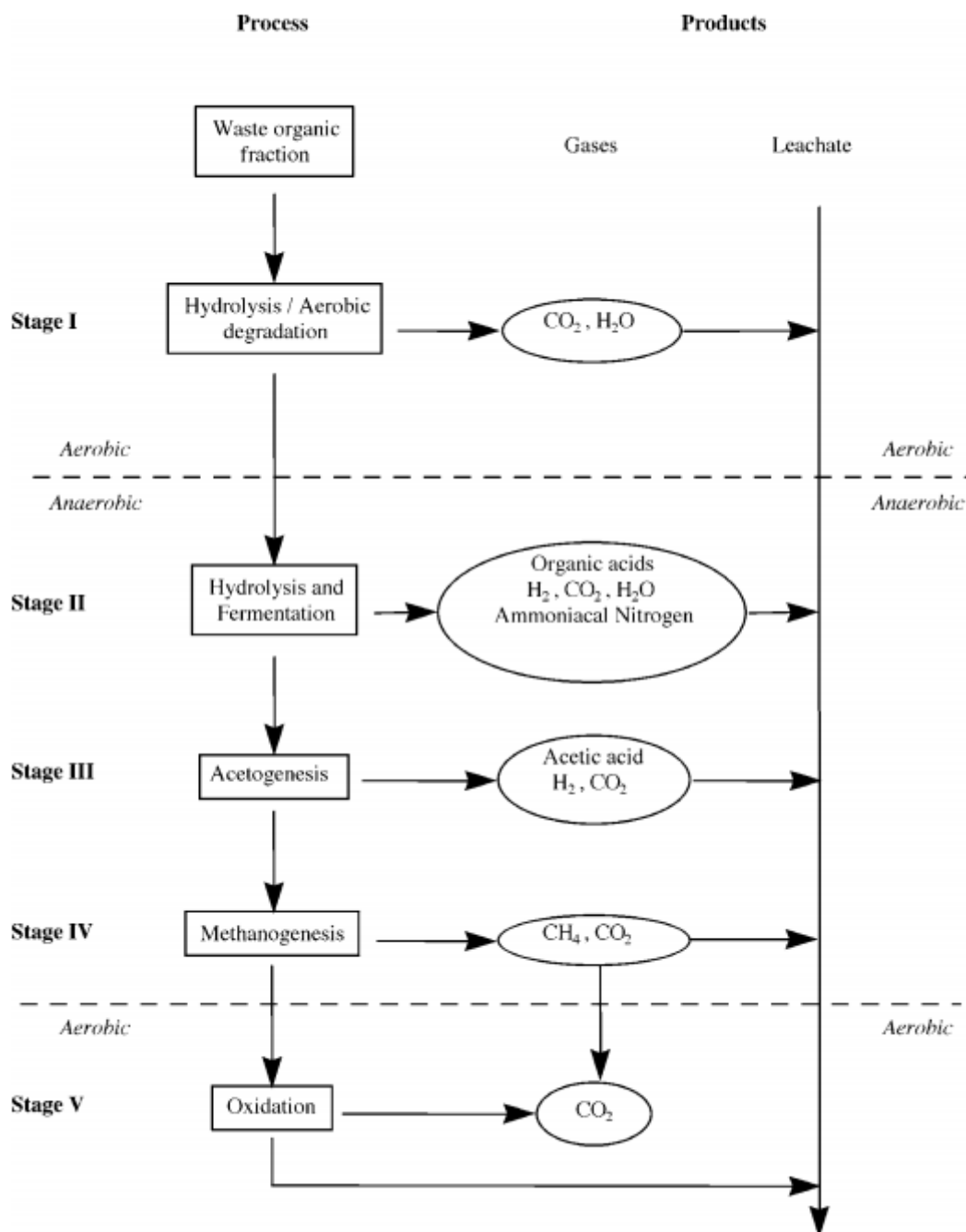


Figura 1 - Principais fases de degradação dos resíduos sólidos urbanos no interior do aterro sanitário.

Fonte: Environmental Protection Agency (2000).

A duração dessas fases é muito variável, depende da distribuição dos compostos orgânicos no interior do aterro sanitário, da disponibilidade de nutrientes, do grau de umidade presente na massa de resíduos e do grau de compactação aplicado (Christine et al, 1989 *apud* Costa, 2015). Embora essa divisão do processo

de degradação dos resíduos em fases facilite a compreensão dos fenômenos de estabilização biológica, e seus impactos sobre a composição dos lixiviados e das emissões gasosas, na prática, durante a vida de um aterro, essas fases não são tão bem definidas. Visto que ocorrem novas deposições de resíduos, causando grande variabilidade na idade do material disposto, por isso pode-se encontrar as três fases ocorrendo simultaneamente em um único aterro (ANDRADE, 2014). As características de lixiviados de Aterros Sanitários Americanos em diferentes idades são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição de lixiviados de Aterros Sanitário nos EUA em diferentes idades

| Parâmetro | Idade do aterro em anos | | | |
|-------------------|-------------------------|-----------------|---------------|---------|
| | 0-5 | 5-10 | 10-15 | >20 |
| DBO ₅ | 10.000 - 5.000 | 1.000 - 4.000 | 50 - 1.000 | < 50 |
| DQO | 15.000 - 40.000 | 10.000 - 20.000 | 1.000 - 5.000 | < 1.000 |
| SST | 10.000 - 5.000 | 5.000 - 10.000 | 2.000 - 5.000 | < 1.000 |
| N-NH ₃ | 500 - 1500 | 300 - 500 | 50 - 200 | < 30 |
| NTK | 1.000 - 3.000 | 400 - 600 | 75 - 300 | < 50 |
| Ferro e Magnésio | 500 - 1.500 | 500 - 1.000 | 100 - 500 | <100 |
| Fósforo | 100 - 300 | 10 - 100 | - | <10 |
| Zinco | 100 - 200 | 50 - 100 | 10 - 50 | <10 |
| Cloreto | 1.000 - 3.000 | 500 - 2.000 | 100 - 500 | <100 |
| pH | 3 - 6 | 6 - 7 | 7 - 7,5 | 7,5 |

Todas as unidades são representadas em mg.L⁻¹, com exceção do pH, que é adimensional.

Fonte: adaptado Gomes (2009).

Na Tabela 3 é apresentada a composição do lixiviado para alguns aterros brasileiros. Devido a estas características apresentada acima, os lixiviados de aterros sanitários são considerados umas das principais fontes de contaminação do solo e das águas superficiais ou subterrâneas. Ao atingir os corpos hídricos, podem provocar alterações nos parâmetros físico-químicos das águas, que podem causar efeitos tóxicos deletérios à biota aquática (BATISTA et al., 2016). E ainda os nutrientes contidos nos lixiviados propiciam o processo de eutrofização de corpos aquáticos, caso seja realizado o seu descarte sem prévio tratamento (FERREIRA; SCHEER; BRAGA, 2014).

Tabela 3 - Características dos lixiviados de aterros brasileiros.

| Parâmetro* | Localização | |
|------------|--------------------------|-----------------------|
| | João Pessoa/PB | São Leopoldo/RS |
| DQO | 12.924 (3.244 - 25.478) | 5.141 (9.777 - 1.319) |
| DBO | 3.638 (3.516 - 3.760) | 3.211 (115 - 7.830) |
| Fósforo | 23 (23 -23) | 14 (1,9 -26) |
| NTK | - | 1.225 (210 - 3.896) |
| pH | 8,3 (8 - 8,6) | 7,8 (7 - 9) |
| ST | 16.331 (11.852 - 25.490) | - |

*Todas as unidades são representadas em mg.L⁻¹, com exceção do pH, que é adimensional. Valores para os diferentes aterros (média (min-máx)).

Fonte: adaptado Gomes (2009).

Para minimizar os impactos ambientais e atender aos requisitos exigidos pelas resoluções CONAMA 430/2011 e CONSEMA 355/2017, torna-se necessário realizar o tratamento desse efluente antes de seu lançamento nos corpos hídricos. Porém, devido à alta carga de contaminantes e de sua variabilidade qualitativa e quantitativa, com o passar do tempo, em um mesmo aterro torna-se difícil definir um processo de tratamento efetivo para o chorume (SILVA, 2017).

2.3 Resíduos da Produção de Arroz

O arroz é um dos cereais mais produzidos e consumidos no mundo. No Brasil, a cadeia orizícola desempenha importante papel na ótica cultural, social e econômica. O arroz é tradicionalmente um dos produtos alimentícios mais consumidos no país, sendo o seu consumo anual estimado em torno de 11,5 milhões de toneladas (CONAB, 2017a). A produção brasileira de arroz não beneficiado na safra agrícola 2016/2017 foi de 12,4 milhões de toneladas (IBGE, 2017), sendo o estado do Rio Grande do Sul o maior produtor deste cereal, cuja produção foi de 8,7 milhões de toneladas na safra 2016/2017 (CONAB, 2017b).

A casca de arroz é um dos maiores resíduos agrícolas, não apresenta valor comercial devido à sua dureza, fibrosidade e abrasividade, é composto principalmente de celulose, lignina e resíduos inorgânicos, e ainda 95 a 98 % de seu peso corresponde a em massa de sílica (REIS; SILVA; NEVES, 2015; SOUZA, 2011). Este resíduo é retirado durante o beneficiamento e representa 20 a 22% em massa do total de arroz processado (BAZARGAN; BAZARGAN; MCKAY, 2015).

Devido a sua composição a casca representa um dos grandes problemas ambientais desta atividade, pois apresenta lenta biodegradação, além dos constituintes fenólicos, que fazem com que permaneça inalterada por longos períodos de tempo (BERWANGER FILHO, 2014).

Uma alternativa para a destinação da casca de arroz é o uso para produção de energia, substituindo a lenha nas agroindústrias, visto que, possui um poder calorífico de 1670 kJ/kg (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2005; HALBERSTADT et al., 2015). Porém, o uso como energia, gera-se outro resíduo, as cinzas da casca de arroz (CCA), que corresponde a 20 % do peso da casca carbonizada (POUEY, 2006).

O descarte inadequado da CCA pode causar impactos negativos no ambiente, devido à presença de carbono residual, sílica (86,37%), além de outros compostos como K_2O , CaO , Al_2O_3 , MgO e P_2O_5 o que podem causar mudanças nas características do solo e da águas (MORAES et al., 2014; NASCIMENTO et al., 2015).

O município de Pelotas é um dos polos beneficiadores de arroz. Se considerarmos apenas 3 indústrias beneficiadoras de arroz que estão estabelecidas em Pelotas, juntas beneficiam cerca de 830.017 toneladas de arroz ao ano (IRGA, 2016), o que equivaleria cerca de 33.200 toneladas de cinzas produzidas. Diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas para avaliar o aproveitamento da CCA na fabricação materiais refratários (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2001), obtenção de sílica (FERREIRA, 2013), confecção de materiais de construção, produção de catalizadores, zeólitas, e carvão ativado (PODE, 2016).

A característica da cinza de casca de arroz indica grande possibilidade de aproveitamento como material adsorvente. Fonseca et al. (2016), obtiveram remoção máxima de cromo hexavalente de 78,4 % a pH 2. Augusto et al (2014) removeram 98 % de BTEX. Ikhlaiq et al (2014) tiveram eficiência 84,5 % de na remoção de cor de uma solução de azul de metileno. No entanto, a cinza de casca de arroz apesar de todas essas aplicações tem como principal destinação no Rio Grande do Sul à aplicação ao solo ou a disposição em aterros (PERS, 2014).

2.4 Adsorção

A adsorção é um fenômeno de superfície no qual ocorre transferência de massa de um composto da fase líquida ou gasosa concentrando-se na sua superfície do sólido, o que permite separá-las dos demais componentes dessas soluções. No qual, permanece ligado a superfície do adsorvente por interações físicas ou químicas, podendo ser reversível ou irreversível (BAYRAM, 2012; BRUNO, 2008; OLIVEIRA, 2003).

A adsorção física ou de van der Waals ocorre forças de atração intermoleculares fracas entre o adsorvente e as moléculas adsorvidas que podem ser reversível. Em virtude da pequena energia envolvida o equilíbrio entre as moléculas do adsorbato e da fase fluida também é atingido rapidamente. Este processo acontece a baixas temperaturas e sem transferência de elétrons. Já a adsorção química, resulta em forças de interação fortes entre a substância adsorvida e o sólido adsorvente, pode ser lenta e irreversível; é um processo possível em ampla variação de temperatura e com transferência de elétrons levando à formação de ligação química entre o adsorbato e a superfície (BAYRAM, 2012).

Segundo Carolina (2012), o fenômeno de adsorção é diretamente relacionada à tensão superficial das soluções e a intensidade do fenômeno depende da temperatura, da natureza e da concentração da substância adsorvida (o adsorbato), da natureza e estado de agregação do adsorvente e do fluido em contato com o adsorvente. E ainda a adsorção pode ser relacionado com as características da fase líquida, como pH, viscosidade e temperatura. A capacidade de adsorção do adsorvente depende da distribuição e tamanho de poros, da área superficial e da afinidade entre este e o adsorbato (BOLIGON, 2015; BRUM et al., 2008).

2.5 Materiais Adsorventes

Adsorventes são materiais carbonáceos de elevada área superficial e estrutura interna de poros bem desenvolvidos, ou seja, com sítios de adsorção capazes de manter em sua superfície moléculas por forças de atração. Os adsorventes mais utilizados e conhecidos se destacam a sílica gel, carvão ativado, antracita, betuminoso, zeólitas sintéticas e diversas argilas (DIAS, 2013; TAUMA, 2013).

Dentre estes o carvão ativado (CA) é um material versátil com aplicações em diversas áreas, principalmente em processos industriais, no tratamento da água e para usos medicinais, redução de material orgânico, sobretudo de espécies que alteram a cor de efluentes (DE COSTA; FURMANSKI; DOMINGUINI, 2015).

O processo de ativação do carvão pode ser físico ou químico. A ativação por processo físico, utilizem-se os gases nitrogênio ou dióxido de carbono para a oxidação da matéria carbonosa em altas temperaturas que chegam a 1000 °C (NOGUEIRA, 2017). Já o processo químico, os materiais de partida são impregnados com uma solução de um agente de desidratação, nos quais podem ser o cloreto de zinco, ácido sulfúrico, hidróxido de potássio ou sódio, ácido clorídrico, dentre outros. A presença do ativante influenciam na decomposição pirolítica e inibem a formação de alcatrão, aumentando o rendimento de carbono (LINHARES; MARCÍLIO; MELO, 2016).

Segundo Tauma (2013), a ativação cria no interior da partícula de carvão poros de tamanhos de macroporos ($> 25\text{nm}$); mesoporos ($1- 25\text{ nm}$); microporos ($< 1\text{nm}$), no qual proporcionam a área superficial interna onde a adsorção ocorre.

Diversos materiais, carbonáceos podem ser utilizados para fabricação de carvão ativado, como por exemplo, endocarpo de coco (ISMAIL et al., 2015), bagaço de cana de açúcar (JORGE; TAVARES; SANTOS, 2015), caroço de pêssego (HEYLMANN, 2015) e caroço de cereja (PIETRZAK et al., 2014) dentre outros resíduos agroindustriais, assim criando oportunidades de aproveitamento desses resíduos, minimizando os problemas ambientais gerados pelo seu descarte.

2.6 Adsorção em Leito Fixo

A adsorção em coluna de leito fixo é método dinâmico, no qual o adsorvato a ser removido da fase líquida ou gasosa passa através de um leito empacotado na forma de grão ou pó a uma taxa e concentração constante, assim progressivamente ocorre a saturação do sólido (OLIVEIRA, 2013).

O processo de adsorção tem seu início quando forma-se uma zona de transferência de massa (ZTM) que está situada próximo à entrada da coluna. No entanto a partir do instante em que o adsorvente da entrada do leito alcança o equilíbrio com o fluido que entra, a ZTM move-se para regiões mais profundas do leito. Este processo de translocação da ZTM ocorre até total saturação da coluna

(FERREIRA, 2014), ou seja, a ZTM é a região da coluna, desde o ponto, onde a concentração do adsorbato na saída da coluna alcançou o valor do limite aceitável no efluente (ponto de ruptura), até o ponto onde o carvão ativado está totalmente saturado. Pode ser considerada como uma região dentro da coluna em que a concentração do sorvato varia de 90% a 5% do seu valor de alimentação. Esta é a região onde a maior parte da transferência de massa ocorre (NASCIMENTO et al., 2014). A esquematização do processo está representado na figura 2.

O ponto de exaustão ou de saturação da coluna é determinada quando a concentração da saída equivale-se a concentração de entrada, ou seja, o adsorvente precisa ser recuperado ou substituído. Esse processo pode ser analisado através de uma curva de saturação denominada curva de ruptura ou *breakthroug*, a qual corresponde à evolução da concentração do adsorbato na saída do leito (BORBA et al., 2006; GARCIA, 2014). Ponto de ruptura é definido como tempo decorrido até que a concentração do adsorbato na saída atinja uma fração da concentração da alimentação (FERNANDES, 2005 *apud* AGUIAR, 2014).

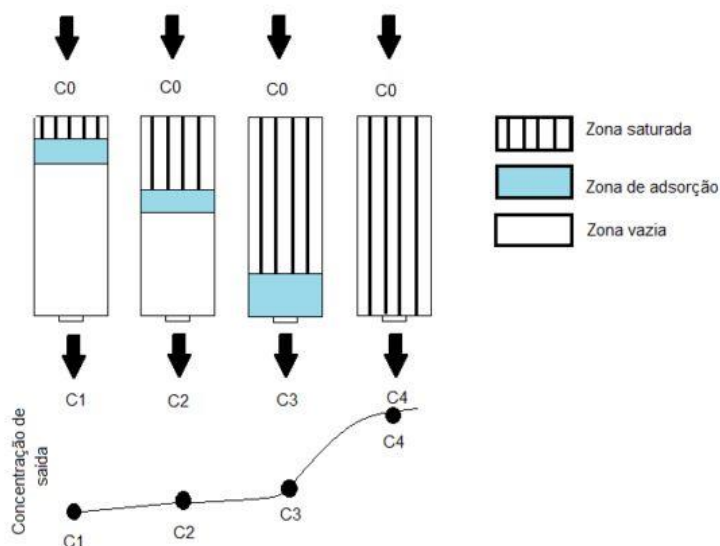


Figura 2 - Curvas de ruptura.

Fonte: (GARCIA, 2014)

A eficiência do adsorvente é determinada pela análise das curvas de ruptura, as quais são representadas por gráficos de C/C_0 , versus tempo ou volume, em que C/C_0 se refere à razão entre a concentração do soluto na saída da coluna em um dado tempo t e C_0 a concentração inicial do soluto na alimentação do sistema

(FERREIRA, 2014). Através da análise da curva de adsorção pode-se identificar o tempo de ruptura (figura 3), que corresponde ao tempo que a partir do qual o leito começa a saturar e o soluto é detectado na saída do leito fixo e o tempo de exaustão, ou seja tempo em que a concentração na saída do leito é próximo ou igual a de entrada (GEANKOPLIS, 2003 *apud* FERREIRA, 2014). O tempo de ruptura pode ser determinado quando a concentração de saída corresponder a 5% da concentração de entrada, ou seja a relação C/C_0 é 0,05, e para o tempo de exaustão quando a concentração do efluente é 95% da concentração inicial (RHEINHEIMER, 2016).

Se o objetivo for fazer o escalonamento dos dados (ou *scale-up*) obtidos a nível laboratorial para um sistema em planta piloto ou industrial, o ponto de ruptura pode ser considerado quando a concentração do adsorvato reduzir a 50% da concentração inicial, assim possibilitando obter o tempo de serviço de uma coluna (VASQUES, 2008).

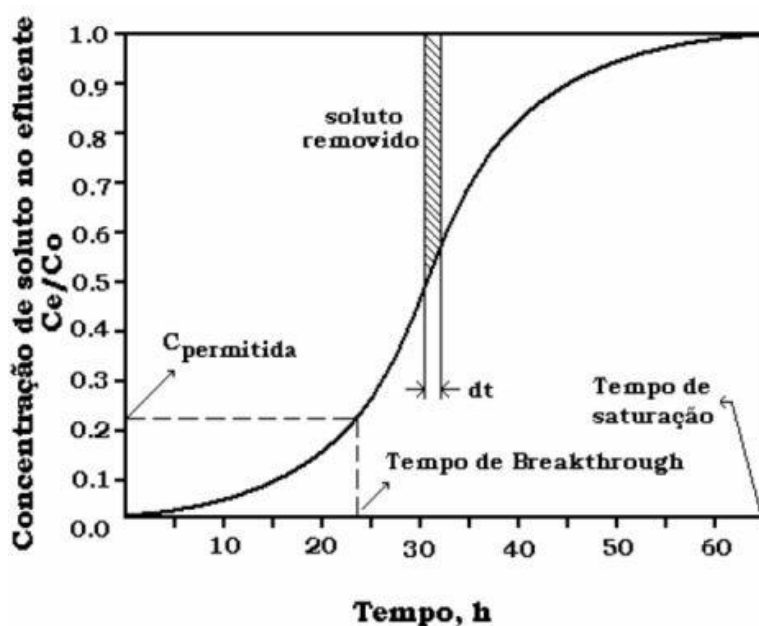


Figura 3 - Curva de Ruptura e ponto de *breakhroug*

Fonte: Ramalho (1983) *apud* Aguiar (2014)

Para avaliação satisfatória de uma coluna de adsorção passa pela predição da curva de ruptura e da capacidade de adsorção determinada por diferentes condições operacionais (KEHL, 2015). Uma vez que, a configuração da curva de ruptura é influenciada por vários fatores, como as características do adsorbato e do

adsorvente, vazão de alimentação, concentração do soluto na alimentação, pH da solução, comprimento do leito de adsorção, diâmetro das partículas do adsorvente (CANTELI, 2013).

O tempo de ruptura (*breakthrough*) diminui com o decréscimo da altura do leito, com o aumento do tamanho da partícula do adsorvente, com o aumento da velocidade do fluido através do leito e com o aumento da concentração inicial do soluto na alimentação (VOLTAN et al., 2016). Portanto, por meio da curva de ruptura pode-se avaliar a eficiência do leito fixo e com isso dimensionar um sistema de adsorção em coluna para fins de tratamento industrial, pois o uso de leito fixo possibilita o tratamento de grandes volumes de efluentes e frequentemente é mais econômica (SIDIRAS et al., 2011).

2.6.1 Modelos Matemáticos para Adsorção em Leito Fixo

As curvas de ruptura obtidas em escala de laboratório servem como base para o design de colunas em grande escala. O *scale-up*, ou seja, o dimensionamento da coluna em escala real pode ser realizado por aproximações matemáticas (RESENDE, 2013).

O modelo descreve o comportamento dinâmico da coluna otimizando as condições de operação. Alguns modelos foram desenvolvidos para interpretar a dinâmica da adsorção em coluna, tais como: modelo de Bohart- Adams, Wolborksa, Yoon-Nelson e Thomas.

Os modelos Bohart-Adams e Wolborksa são modelos indicados para descrever regiões de baixa faixa de concentração das curvas de ruptura, ou seja, são usados para descrever a parte inicial da curva de ruptura (TRGO et al., 2011; CERVANTES et al., 2018). Já o modelo de Yoon-Nelson foi desenvolvido para determinar o tempo no qual a concentração na saída da coluna é metade da concentração inicial e também por ser um modelo equivalente ao modelo Thomas (CERVANTES et al., 2018; OLIVEIRA., 2009).

O modelo de Thomas (1944) é o modelo mais utilizado para representar o desempenho da cinética de adsorção em sistema contínuo, assumindo o pressuposto de que o processo segue a cinética de Langmuir sem dispersão axial

na adsorção da coluna e reação reversível de pseudo-segunda ordem. O modelo de Thomas é expresso pela equação 1 (FERREIRA, 2014; TRGO et al., 2011).

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + e^{\left[\frac{k}{Q} (qm - C_0 v) \right]}} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde:

C: concentração do adsorbato na saída da coluna (mg.L⁻¹);

C₀: concentração inicial da solução de alimentação (mg.L⁻¹);

K: constante de Thomas (mLmin⁻¹.mg⁻¹);

q₀: máxima capacidade de adsorção (mg.g⁻¹);

m_s: massa de adsorvente em gramas (g);

Q: Vazão de alimentação em (mL min⁻¹) e

v: volume de efluente tratado (mL).

A partir do coeficiente k e da máxima capacidade de adsorção q da equação de Thomas são importantes para calcular a massa necessária para tratar um efluente industrial ou água de consumo humano.

3 Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Análise de Águas e Efluentes do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária (EAS), localizado no Centro de Engenharias (CEng) da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). Os estudos foram realizados no período de novembro de 2017 á Fevereiro de 2018.

3.1 Lixiviado de Aterro Sanitário Utilizado

O lixiviado utilizado era proveniente do aterro sanitário da Metade Sul do Rio Grande do Sul, localizado no município de Candiota/RS. O Aterro está localizado nas seguintes coordenadas geográficas (UTM); Latitude: -31,56873500 e longitude: -53,73099600, possuindo uma área licenciada de 332.700,00 m² e vida útil estimada de 15 anos, com capacidade para receber 1.000 toneladas de resíduos/dia. Este aterro sanitário é compartilhado por 19 municípios, atendendo uma população de 588.753 habitantes (PERS, 2014). Na figura 4 está apresentada uma vista área do aterro de Candiota/RS

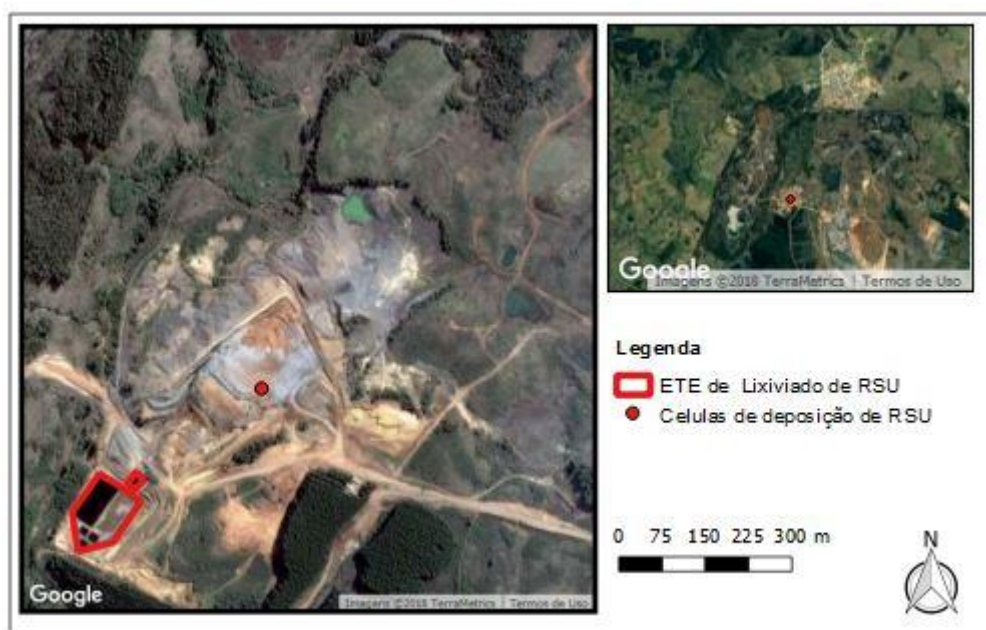


Figura 4 - Vista Área do Aterro sanitário da Metade Sul/ Candiota, RS.

O efluente utilizado foi coletado e acondicionado em um galão de 25 litros, para posterior tratamento em sistema de leito fixo com carvão ativado. A coleta foi realizada pelo responsável técnico pelo sistema de tratamento do aterro sanitário da Metade Sul, tendo como local a última lagoa anaeróbia.

3.2 Caracterização do Lixiviado

O efluente utilizado no trabalho foi caracterizado segundo os parâmetros Demanda Química de Oxigênio, pH, Cor Aparente e Verdadeira na entrada e saída do sistema de leito fixo com carvão ativo de cinza de casca de arroz, segundo a metodologia do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005). Os valores médios do lixiviado bruto utilizado no experimento são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização do lixiviado

| Parâmetro | Média |
|---------------------------|------------------|
| DQO (mg.L ⁻¹) | 4538,61±190,82 |
| pH | 8,14±0 |
| Cor aparente ((UC) | 17600,0 ±1885,62 |
| Cor verdadeira (UC) | 16600,0± 942,81 |

3.3 Carvão Ativado Utilizado

O carvão ativado utilizado foi proveniente de cinza de casca de arroz (CCA). A cinza utilizada neste estudo foi proveniente de uma indústria de beneficiamento de arroz da cidade de Pelotas/RS. Esta indústria realiza o aproveitamento da casca de arroz para geração de energia térmica para seus processos operacionais. O processo de queima nesta empresa ocorre por reator do tipo grelha a uma temperatura de queima 800°C.

O processo de ativação da CCA foi realizado com o agente ativador Hidróxido de sódio. Neste processo, separou-se 600 gramas do material *in natura* no qual adicionou-se 600 gramas de Hidróxido de sódio dissolvido em 2 litros de água destilada, garantindo uma proporção de 1:1 (NaOH/cinza). A mistura permaneceu em contato por 24 horas, posteriormente foi lavada com água destilada com o

objetivo de alcançar a neutralidade e para retirar os íons presentes. Em seguida, os materiais foram secos em estufa a 110°C por 24 horas ou até total secagem.

A concentração do agente ativador foi estabelecido com base no estudo realizado por Muniandy., et al (2014) com diferença no tempo de impregnação. A metodologia escolhida apresenta-se dentro de uma adaptação do trabalho de Le Van & Luong Thi (2014), que também produziram carvão ativado a partir de Casca de arroz.

3.4 Caracterização dos Carvões Ativados Pulverizado

Na tabela 5 são apresentados os resultados obtidos para o grau de umidade, densidade aparente, determinação da granulométrica e a determinação da composição elementar e morfológica do carvão ativado derivado da cinza de casca de arroz, os quais foram obtidos de acordo com as metodologias descrita abaixo:

a) Determinação da umidade

A técnica empregada consiste na secagem em estufa (130 °C \pm 5°C) para remoção da água por aquecimento. As amostras foram colocadas em cadinhos com tampa que foram previamente tarados e submetidos a secagem a temperatura de 130 °C \pm 5°C por 3 horas. Posteriormente os cadinhos contendo as amostras foram resfriados em um dessecador, tendo sua massa determinada. Este procedimento de secagem e resfriamento é repetido até a obtenção de massa constante. Procedimento executado acordo com a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas MB 3414/1991.

b) Densidade aparente

O método empregado corresponde a determinação da massa específica aparente do carvão ativado pulverizado, que é a massa de amostra compactada por unidade de volume, sendo expressa em g.cm⁻³ (MB 3413, 1991).

c) Determinação granulométrica

O método utilizado versa em determinar a porcentagem de carvão passante em peneiras ABNT n° 100, 200 e 325. Foram secas 25 gramas de amostra a temperatura de (130 °C \pm 5°C) por 3 horas, posteriormente resfriadas em dessecador. Uma fração de 5 gramas do material foi transferida para a peneira junto

a sua lateral, e com um filete de água passou-se o material. O ponto final do ensaio foi determinado quando não houve mais passagem do material pela peneira. A realização do procedimento foi realizado em triplicata (MB 3412, 1991).

d) Determinação da composição elementar e morfológica do adsorvente

A morfológica e composição elementar da superfície do precursor (CCA) e carvão ativado foi mapeada com o sistema Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplado a um sistema de EDS. As análises foram realizadas utilizando um microscópio electrónico de varredura (JEOL JSM 6610, Japão). As amostras foram metalizadas com ouro. Foi utilizada aceleração de voltagem de 15 kV e faixas de magnificação variando de 50 a 2500 vezes. A morfologia e composição elementar foi realizado no Laboratório de Operações Unitárias do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), durante o período do primeiro semestre de 2017

Tabela 5 - Resultados de Granulometria, umidade e massa específica para o carvão ativado de CCA.

| Características | Carvão ativado Experimental | Limite Permitido pela ABNT-EB 2133 |
|---|--|---|
| Umidade (%) | 2,37±0,2 | Máx.8 |
| Massa específica aparente g.cm ³ | 0,25± 0,004 | 0,20 a 0,75 |
| Granulometria (% em massa passante) | | |
| Peneira ABNT nº 100 | 38,8± 2,35 | Mín. 99,0 |
| Peneira ABNT nº 200 | 80,2± 1,64 | Mín. 95,0 |
| Peneira ABNT nº 325 | 97,4± 0,05 | Mín. 90,0 |

Os resultados em termos de espectros EDS e Imagens de MEV para o precursor e o carvão ativado são apresentados nas figuras 5 e 6.

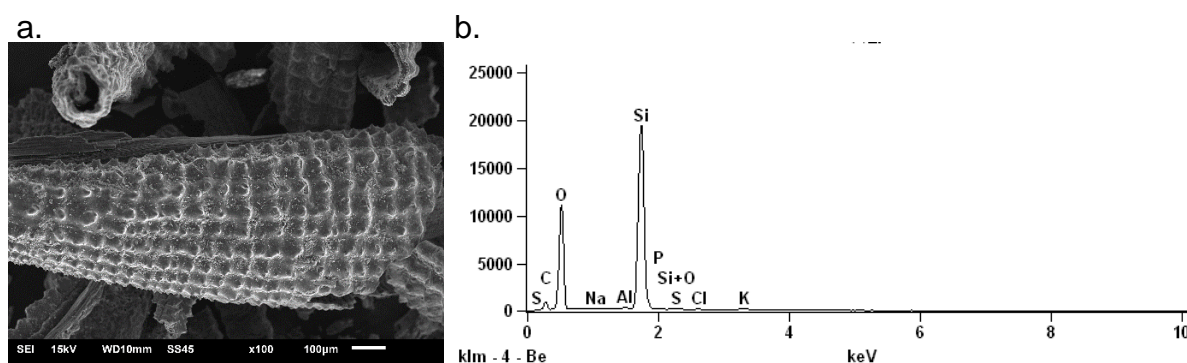


Figura 5 - Espectro do EDS para a Cinza de Casca de Arroz *in natura*.

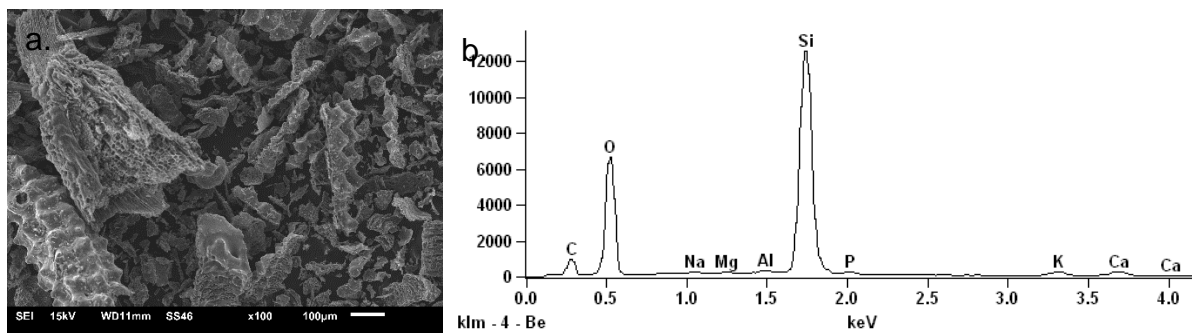


Figura 6 - Espectro do EDS para o carvão ativado quimicamente com NaOH.

Na figura 6a., observa-se a formação de um material com uma estrutura de interstícios mais evidentes, sugerindo o aparecimento da estrutura porosa.

A partir das figuras 5b e 6b observa-se a presença majoritária, Silício e oxigênio, e ainda apresentando em sua composição os elementos enxofre, carbono, cálcio, magnésio, sódio, alumínio, fósforo, cloro, óxido de silício e potássio.

3.5 Ensaios de Adsorção em Coluna de Leito Fixo

Para os ensaios de adsorção em fluxo contínuo descendente foi construída uma coluna de vidro com comprimento de 30cm, diâmetro interno de 5cm, e o fluxo era mantido por meio de uma bomba peristáltica (figura 8).

Foram feitos dois ensaios em coluna de carvão ativado de cinza de casca de arroz denominada C1 e C2. Sendo, C1 o ensaio com altura de leito de 5cm (figura 7 a), e C2 altura de leito de 20cm (figura 7b), correspondendo a massas de adsorvente de 24 e 95 gramas, respectivamente. Os experimentos foram realizados em Triplicata para cada altura de leito.

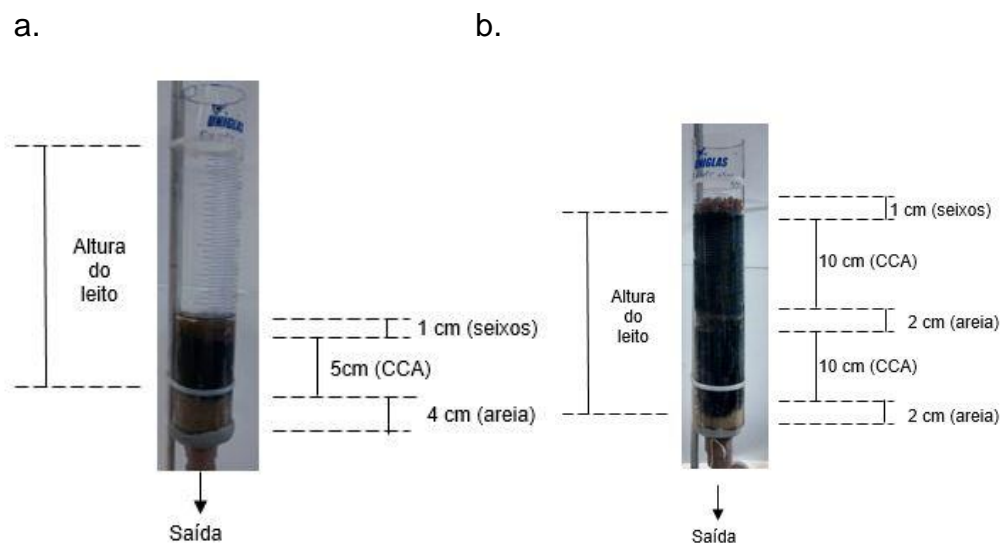


Figura 7 - colunas de adsorção (a) C1, (b) C2



Figura 8 - Bomba controladora de vazão

Para a montagem da coluna, inicialmente colocou-se um conjunto de telas na base inferior da coluna, com propósito de reter partículas que eventualmente são arrastadas pelo fluxo de líquido que podem obstruir ou diminuir a capacidade de abertura do sistema coletor. Em seguida, foi introduzida uma camada de areia, que tem o propósito de operar como camada suporte do adsorvente, cujas partículas foram compactadas com pequena trepidação. Posteriormente, introduziu-se uma camada de carvão, no qual também foi submetido a penas trepidações para compactação do material. Por fim, na base superior foi adicionada uma camada de seixos para facilitar a distribuição de fluxo na camada de adsorvente, assim minimizando os efeitos da formação de caminhos preferenciais durante sua operação.

Na montagem do leito de altura de 20cm (figura 7b), a areia foi dividida e distribuída na base e no centro da coluna, cujo objetivo é funcionar como suporte e difusor de líquido no interior do leito.

O início do teste ocorreu quando o sistema estava completamente preenchido com a amostra e a vazão estiver ajustada. Portanto, os primeiros minutos de coleta de efluente passante foram descartados. Posteriormente em intervalos de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180, 210 e 220 minutos foram efetuadas coletas para o monitoramento da evolução da concentração na saída da coluna. Os parâmetros analisado foram DQO, cor.

O efluente utilizado nos experimento foi o lixiviado bruto de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos, na qual sua caracterização esta apresentada na tabela 4. O efluente foi recalcado por uma bomba (figura 8) a uma vazão de 8mL.min⁻¹. Todos os ensaios foram realizados em temperatura ambiente.

3.6 Análise de Dados da Coluna de Leito Fixo

A capacidade de adsorção da coluna foi determinada pela seguinte equação:

$$q = \frac{C_0 Q}{m_s} \int_0^t \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dt \quad (\text{Eq.2})$$

Sendo:

q = a capacidade de adsorção do adsorvente em (mg g⁻¹);

C₀ = concentração inicial do fluido na alimentação (mg L⁻¹);

C = concentração do fluido na saída da coluna (mg L⁻¹);

Q = vazão volumétrica da solução (L min⁻¹);

t = tempo (min)

m_s = massa seca do adsorvente (g)

A eficiência de remoção pela equação abaixo,

$$\%R = \frac{(C_0 - C)}{C_0} * 100 \quad (\text{Eq.3})$$

Sendo,

%R = Percentual de remoção

C₀ = concentração inicial do fluido na alimentação (mg L⁻¹);

C = concentração do fluido na saída da coluna (mg L⁻¹);

O tempo de *Breakthrough* foi obtido pela inclinação da curva de evolução da concentração do adsorbato na saída do leito, a qual consiste na relação de C/C_0 versus o tempo. Sendo o ponto de ruptura considerado foi de $(C/C_0) \geq 0,3$ para C1 e $(C/C_0) \geq 0,1$ para C2 e ponto de saturação $(C/C_0) \geq 0,8$ para C1 e C2. Os valores de tempo de ruptura e saturação podem ser arbitrados conforme padrões de projeto em escala industrial ou ainda o tempo em que a concentração saída equivale a um valor de referência estabelecido pela legislação vigente (ABRÃO, 2014). Para verificar a diferença do desempenho da CCA ativada em diferentes alturas foi aplicado o teste de ANOVA para os parâmetros, e tempo, sendo aplicado o Teste de Fischer para comparar as médias de cada determinação, ao nível de 5% de probabilidade.

Para correlacionar a altura de leito e o tempo de ruptura foi aplicado o modelo Thomas (equações 1), em que a relação C/C_0 foi plotados em função do tempo. O modelo de Thomas é o mais utilizado para representar o desempenho das colunas de adsorção. Os outros modelos não foram aplicados a este estudo devido as suas características já descritos no item 2.6.1.

O coeficiente K e da máxima capacidade de adsorção q do modelo empírico de Thomas, e a análise de variância anova foi estimado por regressão não linear com auxílio do software Statistic7.0 (Statsoft, EUA). O ajuste do modelo aos dados experimentais foram avaliados mediante os coeficientes de correlação (R^2) e o erro médio relativo (EMR) (Equação 4):

$$EMR = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\frac{C}{C_{0t,exp}} - \frac{C}{C_{0t,pred}}}{\frac{C}{C_{0t,exp}}} \right) \quad (\text{Eq,4}).$$

Sendo,

C/C_0 , exp. e C/C_0 , pred. os valores experimentais e teóricos da curva de ruptura.

4 Resultados e Discussão

4.1 Curvas de Ruptura para o Processo de Remoção de DQO

Na figura 9 são apresentadas as curvas de ruptura para os ensaios C1 e C2 para adsorção de carga orgânica (DQO) em leito fixo, utilizando o chorume bruto caracterizado na tabela 4.

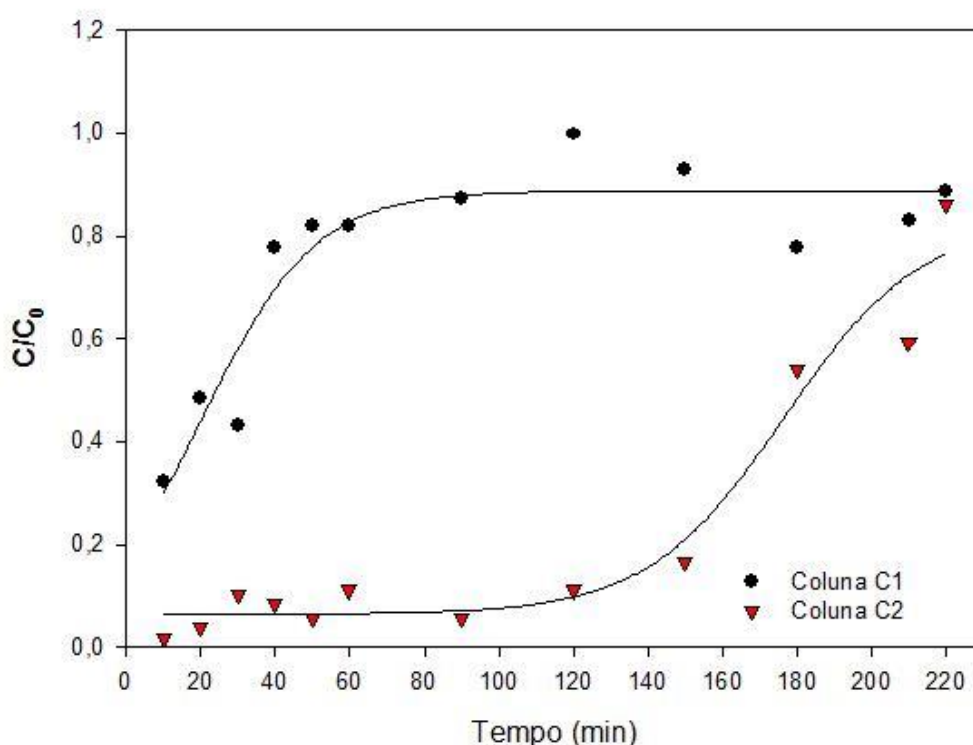


Figura 9 - Curvas de ruptura para os ensaios C1 e C2 na remoção de matéria orgânica (DQO)

A partir da figura 9 pode se observar que o leito C1 atingiu a saturação rapidamente num um intervalo de tempo de 40 minutos, correspondendo uma eficiência de remoção de carga orgânica neste tempo de 22,39 % e eficiência no tempo de ruptura de 67,66%. Já o C2 observa-se que com o aumento da massa de leito, a vazão constante, faz com que o tempo de ruptura seja de 120 minutos, tendo como consequência a postergação do ponto de saturação. Obtendo uma eficiência de remoção no tempo de ruptura de 88,91%. O aumento do tempo de ruptura do sistema C2 pode ser observado na figura 9, onde a inclinação da curva é menor em relação ao sistema C1. Esses valores são compatíveis ao trabalho desenvolvido por

Cotan & Gotvajn (2010), os quais obtiveram eficiência de remoção de matéria orgânica de lixiviados de aterro sanitário de 63-92 %.

Portanto, os sistemas testados apresentam considerada eficiência de remoção de carga orgânica expressa em termos de DQO (tabela 6). O bom desempenho do sistema na remoção de DQO, pode ser relacionados a diversos fatores.

Tabela 6 - Características dos ensaios C1, C2 para a remoção de DQO.

| Parâmetros | Ensaio | |
|--|--------------------|--------------------|
| | C1 | C2 |
| Altura de Leito (cm) | 5 | 20 |
| Vazão (mL.min ⁻¹) | 8 | 8 |
| t _r (min) | 10 | 120 |
| q _r (mg.g ⁻¹) | 10,23 ^a | 40,77 ^a |
| DQO _r (mg.L ⁻¹) | 1467,89 | 503,145 |
| t _s (min) | 40 | 220 |
| q _s (mg.g ⁻¹) | 13,55 ^a | 11,57 ^a |
| DQO _s (mg.L ⁻¹) | 3522,013 | 3914,37 |
| Eficiência de remoção (%) | 67,65 | 88,91 |

Letras iguais representam que não teve diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Remoção da carga orgânica por processo físicos, ou seja, ao ser aplicado o efluente a ser tratado no filtro a material em suspensão é filtrada do líquido. Os espaços dos poros entre os grãos do adsorvente são pequenos e a velocidade do líquido também, esses fenômenos auxiliam na aproximação ou colisões das partículas que acabam floculando. A floculação promove o aumento do peso da partícula podendo desestabiliza-las e provocar a sedimentação das partículas na superfície do sólido. Portanto, quanto maior a profundidade da camada filtrante maior o potencial de retenção de partículas em suspensão, porém não infinitamente, pois os conglomerados passam a obstruir os poros e assim a capacidade de purificação é reduzido pela perda de pressão (DAVIS, 2017). A fração partícula representa grande parte da matéria orgânica expressa como demanda química de oxigênio (DQO) (REQUE, 2015).

Os aspectos do tamanho do grão do adsorvente contribui para elevada eficiência de remoção de DQO, ou seja quanto menor a partícula maior a capacidade de adsorção (TAUMA, 2013). Esse fato vem a corroborar com a boa eficiência de remoção de DQO pelo adsorvente de cinza de casca de arroz, visto que o tamanho médio das partículas de carvão utilizado no experimento variam de 0,150 a 0,0400 mm. (Tabela 5). O tamanho do poro também é um fator importante, pois carvões com macro porosidade permitem a remoção de composto de interesse pelo fenômeno de migração do contaminante para o interior do poro (TAUMA, 2014). Portanto, o processo de ativação da cinza de casca de arroz pode se dizer que foi eficiente na construção de porosidade, evidenciados na imagem de MEV apresentada na figura 6.

E ainda, a aproximação das partícula da superfície do adsorvente potencializa o processo de adsorção. As cargas da superfície do adsorvente passam a interagir com o adsorvato com maior intensidade. O processo passa atuar por interações físicas ou químicas (BAYRAM, 2012; RHEINHEIMER, 2016). Além disso, com o aumento do comprimento do leito, e a densidade de sítios ativos da superfície, promovem maior tempo de contado da superfície do carvão com o contaminante, favorecendo a capacidade de adsorção do carvão (LUZ, 2012).

A partir da curva de ruptura (figura 9) foi possível calcular a capacidade de adsorção de matéria orgânica do carvão produzido com cinza de casca de arroz, obtendo-se como resultados para o ponto de ruptura $10,23 \text{ mg.g}^{-1}$ e $40,77 \text{ mg.g}^{-1}$ para C1 e C2 respectivamente. Os resultados de remoção de matéria orgânica estão apresentados resumidamente na tabela 6.

4.2 Curvas de ruptura para o processo de remoção de cor para os sistemas C1 e C2

Nas tabelas 7 e 8 são apresentados os resultados de remoção de cor aparente e verdadeira para os sistemas C1 e C2. Na figura 10 são apresentadas as curvas de ruptura na remoção de cor aparente e verdadeira respectivamente.

Tabela 7 - Características dos ensaios C1, C2 para a remoção de cor aparente

| Parâmetros | Ensaio | |
|--------------------------------------|---------------------|----------------------|
| | C1 | C2 |
| Altura de Leito (cm) | 5 | 20 |
| Vazão (mL.min ⁻¹) | 8 | 8 |
| t _r (min) | 20 | 40 |
| q _r (mg.g ⁻¹) | 79,77 ^a | 54,81 ^a |
| Cor _r (UC) | 5633,3 | 2216,67 |
| t _s (min) | 210 | 220* |
| q _s (mg.g ⁻¹) | 289,33 ^b | 220,15 ^{b*} |
| Cor _s (UC) | 13466,67 | 5716,67* |
| Eficiência de remoção (%) | 67,99 | 87,40 |

* valores obtidos para o tempo total de operação. Letras iguais representam que não teve diferença significativa e letras diferentes apresentam diferença pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Pelas curva de ruptura (figura 10a e b e tabelas 7 e 8) observar-se que o sistema C1 obteve tempos de ruptura de 20 minutos e 30 minutos para a cor aparente e verdadeira e tempo de saturação de saturação de 210 minutos para ambas. O aumento do comprimento do leito (figura 10a e 10b e tabela 7 e 8), fez com que o tempo de ruptura fosse superior, sendo os tempos para cor aparente e verdadeira de 40 min e 50 min, respectivamente. E ainda, o sistema C2 devido ao seu comprimento de leito, a curva de ruptura ainda está em processo de evolução da concentração de saída, ou seja, o sistema não atingiu o tempo de saturação ou equilíbrio. O comportamento da curva de C2 indica o lento processo de adsorção, pois apresenta pouca inclinação em relação ao eixo do tempo de operação. Este fenômeno é observado para ambos os processos de remoção de cor aparente e verdadeira para o sistema C2.

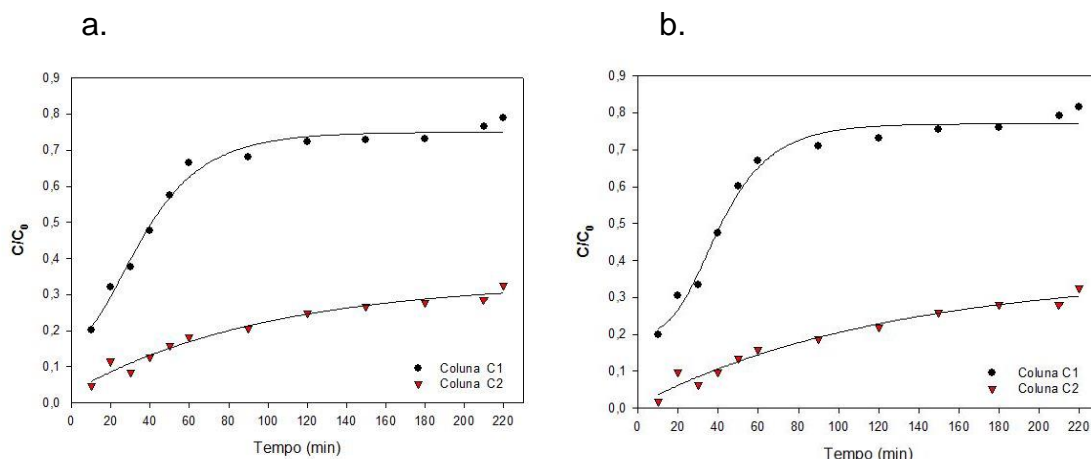


Figura 10 - Curvas de ruptura de remoção de cor aparente (C1a e C2a) e cor verdadeira (C1b e C2b).

Tabela 8 - Características dos ensaios C1, C2 para a remoção de cor verdadeira

| Parâmetros | Ensaios | |
|--------------------------------------|---------------------|----------------------|
| | C1 | C2 |
| Altura de Leito (cm) | 5 | 20 |
| Vazão (mL.min ⁻¹) | 8 | 8 |
| t _r (min) | 30 ^a | 50 ^b |
| q _r (mg.g ⁻¹) | 110,5 | 60,56 |
| Cor _r (UC) | 5550,0 | 2216,7 |
| t _s (min) | 210 | 220* |
| q _s (mg.g ⁻¹) | 242,67 ^c | 207,80 ^{c*} |
| CO _r s(UC) | 13133,33 | 5383,33* |
| Eficiência de remoção (%) | 66,56 | 86,64 |

* valores obtidos para o tempo total de operação. Letras iguais representam que não teve diferença significativa e letras diferentes apresentam diferença pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

O maior tempo de operação dos leitos no processo de remoção de cor pode ser atribuídos aos fatores como polaridade do contaminante, massa molecular, concentração, e pH da solução, adsorção seletiva, dentre outros.

Visto que um dos principais constituintes da matéria orgânica recalcitrante do lixiviado são as substâncias húmicas, e ácidos fúlvicos que se traduzem por substâncias de elevado peso molecular (COSTA, 2015). Os ácidos fúlvicos e os ácidos húmicos representam de 10 a 60% da matéria orgânica dissolvida presente no lixiviados mais estabilizados (COSTA, 2010). Essas substâncias são responsáveis pela coloração dos lixiviados (QUEIROZ et al., 2011).

Os compostos de grande peso molecular e apolares, podem ser facilmente removidos da solução aquosa por adsorção, através de dois efeitos a solubilidade e

atração superficial. Bem como por meio do princípio de desestabilização por coleções de partículas, este fenômeno ocorre devido à alta concentração do contaminante em solução (TAUMA, 2013).

A partir das curva de ruptura foi possível estimar a eficiência de redução de cor do lixiviado caracterizado na tabela 4, sendo os valores encontrados de eficiência no tempo de ruptura de 67,99% e 66,56% para o leito C1 na remoção de cor aparente e verdadeira respectivamente. Já o sistema C2 87,40 % e 86,64 % de cor aparente e verdadeira. Sendo as figuras 11 e 12 a apresentação do efeito da redução de cor do lixiviado. Os valores de eficiência na remoção de cor encontrados neste experimente são compatíveis com os estudos de Costa (2010) que observe uma redução de cor de 70 % com tratamento combinados de coagulação e adsorção do lixiviado.

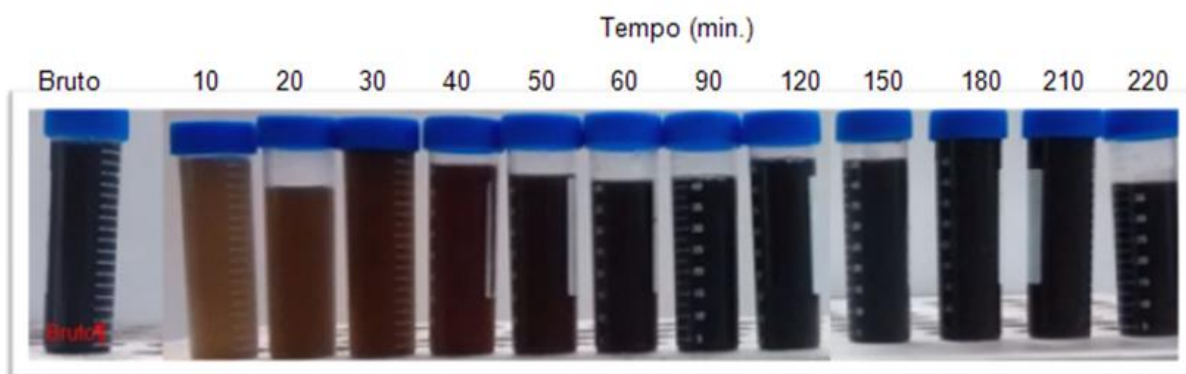


Figura 11 - Remoção de cor do chorume pelo processo de adsorção com massa de carvão ativado de CCA do sistema C1

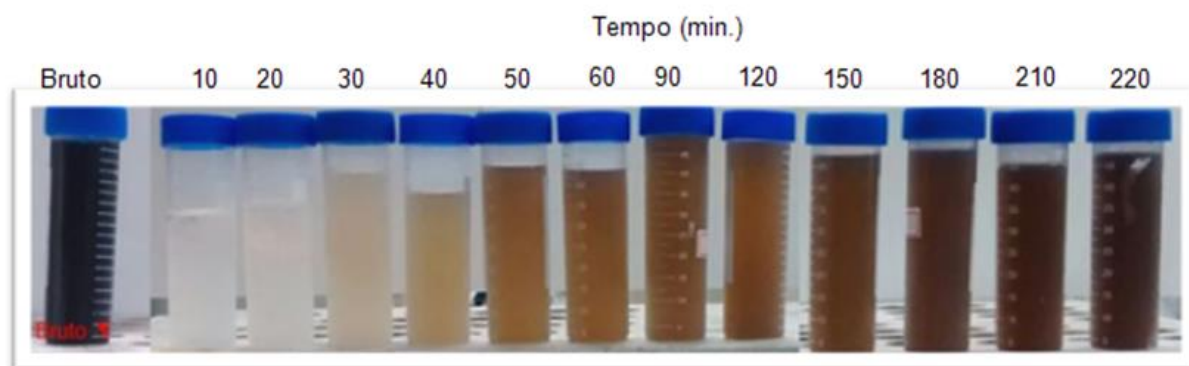


Figura 12 - Remoção de cor do chorume pelo processo de adsorção com massa de carvão ativado de CCA do sistema C2

4.3 Curvas de ruptura para o modelo de Thomas dos sistemas C1 e C2

Na tabela 9 e figura 13 são apresentados os resultados das curvas de ruptura para o modelo de Thomas, considerando os parâmetros de DQO, cor aparente e cor Verdadeira.

Tabela 9 - Parâmetros determinados pelo modelo Thomas

| Parâmetro | Leito fixo | qmax (mg.g ⁻¹) | K (mL.mg ⁻¹ .min ⁻¹) | R ² | EMR |
|--------------|------------|-------------------------------|--|----------------|-------|
| DQO | C1 | 2,44 | 0,273 | 0,729 | 11,94 |
| | C2 | 34,59 | -0,153 | 0,928 | 636 |
| Cor aparente | C1 | 7,512 | 0,108 | 0,766 | 18,17 |
| | C2 | 357,10 | 0,041 | 0 | 100 |
| Cor real | C1 | 7,774 | 0,104 | 0,784 | 19,31 |
| | C2 | 527,30 | 0,0078 | 0,876 | 2727 |

A partir da tabela 9 observa-se que no parâmetro cor aparente para o leito C2 o modelo não apresentou correlação com os dados experimentais, figura 13d. Tendo-se como melhor ajuste ao modelo o parâmetro DQO para o Leito C2, onde o R² é de 0,928. A baixa correlação do modelo pode ser atribuído ao fato de não considerado o efeito de competição de sítios por multicomponentes (DO NASCIMENTO et al.,2014). Sendo, a complexa composição do lixiviado (tabela 2) um interferente na predição da adsorção pelo modelo de Thomas.

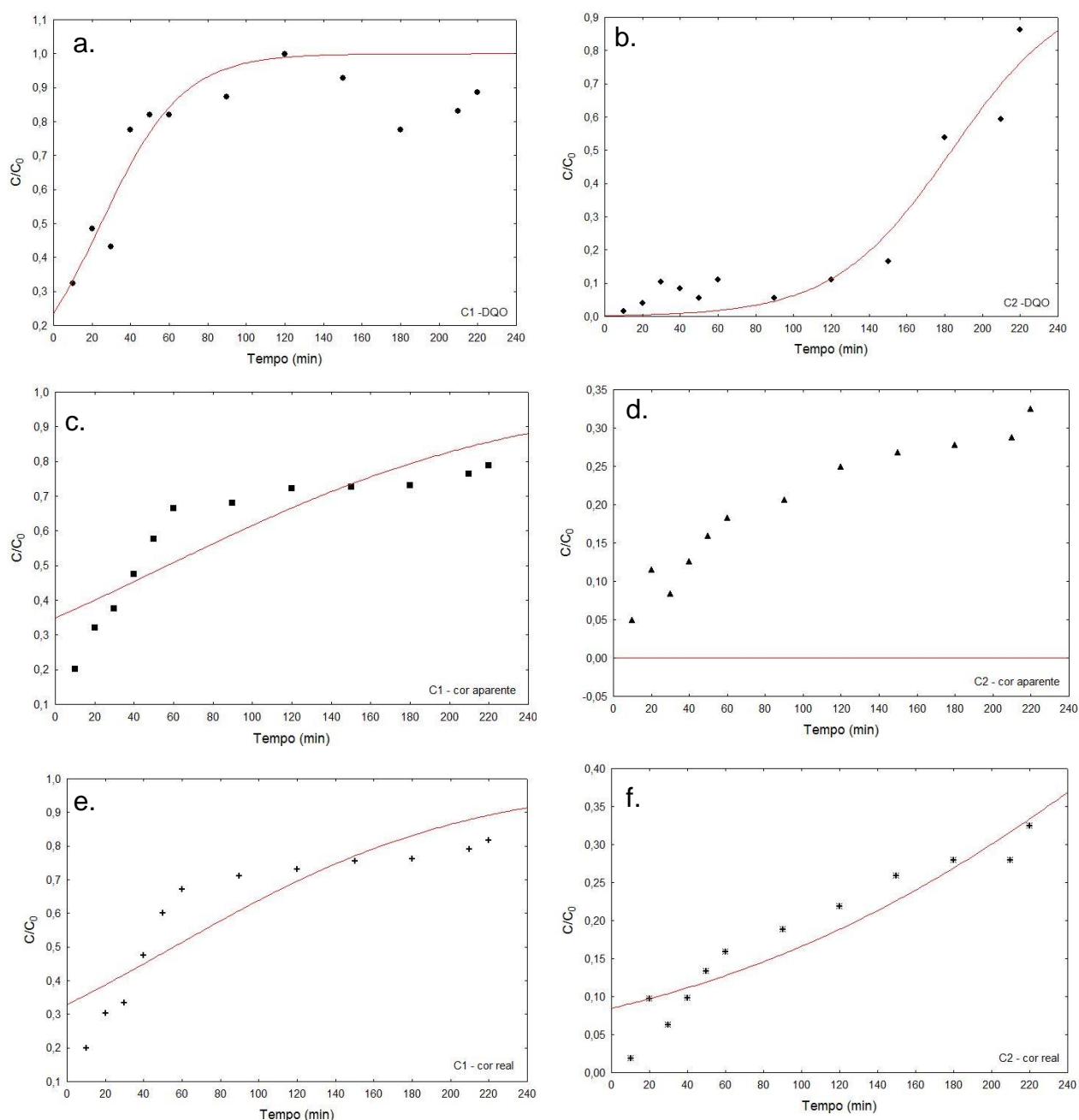


Figura 13 - Curvas de Ruptura do modelo de Thomas: (a) C1- DQO, (b) C2 -DQO, (c) C1 Cor aparente, (d) C2 – cor aparente, (e) C1 – cor verdadeira, (f) C2 – cor verdadeira.

5. Conclusão

Os testes de adsorção em leito fixo permitiram a determinação das curvas de ruptura para o carvão ativado produzido de cinza de casca de arroz, para diferentes alturas de leito (5cm e 20cm), bem como sua relação com a eficiência de remoção para os parâmetros DQO, Cor aparente e verdadeira.

Os experimentos em escala de bancada também permitiram determinar os pontos de ruptura e saturação para cada condição estudada, ou seja, altura de leito. O estudo demonstrou que o sistema com maior altura de leito apresentou maiores tempos de ruptura e saturação para todos os parâmetros (DQO e Cor) analisados.

A complexa composição do lixiviado interferiu a obtenção dos parâmetro da modelagem matemática desenvolvida por Thomas, no qual obteve baixos coeficientes de correlação.

Os sistemas de leito fixo apresentaram boa eficiência de remoção, apresentando percentual de remoção superior a 60% para todos os parâmetros (DQO e Cor) analisados.

A melhor condição de operação para o processo de adsorção em leito fixo foi o sistema C2, o qual possui altura de leito de 20cm e areia intercalando a camada de carvão ativado de CCA.

De maneira geral, o estudo se mostrou eficiente para obtenção das curvas de ruptura que descrevem o processo dinâmico de adsorção em leito fixo. Neste caso, mais estudos com alterações de outros parâmetros devem ser realizados.

Referencias

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **EB-2133**: Carvão Ativado Pulverizado. Rio de Janeiro, 1991.2p.

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **MB-1363**: Amostragem de Carvão ativado pulverizado, Rio de Janeiro, 1991.2p.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **MB-3412**: Carvão Ativado Pulverizado – Determinação Granulométrica. Rio de Janeiro, 1991.2p

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **MB-3413**: Carvão Ativado Pulverizado – Determinação da Massa Específica Aparente. Rio de Janeiro, 1991.1p.

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **MB-3414**: Carvão ativado pulverizado – determinação da umidade. Rio de Janeiro, 1991. 2p.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT_ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 10004**: Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABRÃO, A. Operações de Troca Iônica. Livro texto da matéria ministrada pelo autor da disciplina QFL-754. São Paulo, 2013.

ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. São Paulo: 2017.

AGUIAR, Catia Rosana Lange de. **Adsorção do corante têxtil amarelo básico 28 sobre carvão ativado: modificação, isotermas, cinética e reúso**. 2014. p. 208, Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

ANDRADE, R. M DE; FERREIRA, J.A. A gestão de resíduos sólidos urbanos no brasil frente às questões da globalização. **Revista Eletrônica do Prodema**, v. 6, p. 7–22, 2011.

ANDRADE, Samara Ferreira. **Aplicação da técnica de recirculação de chorume em aterros tropicais – estudo de caso do aterro sanitário metropolitano centro (asmc)**. 2014. 173f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana da) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

AUGUSTO, J. et al. Como Adsorvente Alternativo Para Remoção De Btex Em Efluente Industrial , Através Do Uso De Um Sistema De Filtração Com Pressão Positiva. IN: 5 Foram Internacional de Resíduos Sólidos, 5., 2014. São Leopoldo. **Anais...** São Leopoldo: UNISINOS, 2014.

AZIZ, S.Q. et al. Adsorption isotherms in landfill leachate treatment using powdered activated carbon augmented sequencing batch reactor technique: Statistical analysis by response surface methodology. **International Journal of Chemical Reactor Engineering**, v 10, n.1, p. 1-21, 2012.

BACELAR, Harley Alves da Mata. **Tratamento de lixiviados produzidos em aterro de resíduos sólidos urbanos por meio de evaporação forçada**. 2010. 76f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

BATISTA, M.M et al. Qualidade do efluente final do sistema de lagoas de estabilização no tratamento de lixiviado de aterro sanitário. In: VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 7.,2016. Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: IBEAS, 2016. p. 1–7.

BAYRAM, Suher Carolina Yabroudi Bayram. **Remoção de matéria orgânica e nitrogênio de lixiviados de aterro sanitário: tratamento por nitrificação/desnitrificação biológica e processos físico-químicos**. 2012. 192f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

BAZARGAN, A.; BAZARGAN, M.; MCKAY, G. Optimization of rice husk pretreatment for energy production. **Renewable Energy**, v. 77, p. 512–520, 2015.

BERWANGER FILHO, JORGE AUGUSTO. **Utilização de cinza de casca de arroz para remoção de hidrocarbonetos aromáticos em efluente petroquímico, através de um sistema de filtração com pressão positiva**. 2014. 173f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2014.

BOLIGON, JACQUELINE. **Produção e caracterização de carvão ativado a partir da borra de café solúvel**. 2015 .79 f. Dissertação(Mestre em Tecnologia de Alimentos)- Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2015.

BORBA, C. E. et al. Removal of nickel(II) ions from aqueous solution by biosorption in a fixed bed column: Experimental and theoretical breakthrough curves. **Biochemical Engineering Journal**, v. 30, n. 2, p. 184–191, 2006.

BRASIL. Lei nº 12.305 de 2 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2 de Ago. de 2010. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 20 Out. 2017.

BRUM, S. S. et al. Preparação e caracterização de carvão ativado produzido a partir de resíduos do beneficiamento do café. **Química Nova**, v. 31, n. 5, p. 1048–1052, 2008.

BRUNO, Mariza. **Utilização de zeólitas sintetizadas a partir de cinzas de carvão na remoção de corante em água**. 2008. 201f. Dissertação (Mestrado em Ciências

na Área de Tecnologia Nuclear) - Instituto De Pesquisas Energéticas E Nucleares, São Paulo, 2008.

CAMPOS, Rafaella. **Estudo de tratabilidade de ácidos húmicos e lixiviado de aterro sanitário por lodos ativados em escala de bancada**. 2013. 157f.

Dissertação (Mestre em ciências) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

CANTELI, Anderson Marcos Dias. **Recuperação do Aroma de Café, Benzaldeído, em Coluna de Adsorção Utilizando Carvão Ativado**. 2013 p. 131. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

CASSINI, Sérgio Túlio (coord). Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás. **PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico**, 2003.

CERVANTES, J.L. et al. Study of a fixed-bed column in the adsorption of an azo dye from an aqueous medium using a chitosan–glutaraldehyde biosorbent. **Adsorption Science & Technology**, Vol. 36, p. 215–232, 2018.

CHRISTENSEN, T., COSSU, R. & STEGMANN, R. Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact. Copyright ©, 1989.

CONAB- Companhia Nacional de Abastecimento. Perspectivas para a agropecuária. V. 5, p 1-111, Brasília, CONAB, 2017a. Disponível em:< <https://https://www.conab.gov.br/index.php/perspectivas-para-a-agropecuaria> > Acesso em: 27 Fev. 2018.

CONAB -- Companhia Nacional de Abastecimento. Compendio de Estudos: Evolução dos custos de produção e rentabilidade do arroz irrigado gaúcho nos anos-safra 2006/07 a 2016/17. V. 11, Brasília, CONAB, 2017b. Disponível em< https://https://www.conab.gov.br/uploads/arquivos/17_10_02_10_10_32_11_compendio_de_estudos_conab_arrozgaucho_2017_revisado.pdf>. Acesso em: 27 Fev. 2018b.

COSTA, Tiago Jorge Sousa da. **Tratamento de Lixiviados de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos em Portugal Engenharia Civil**. 2015. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Federal Tecnológico (IFT), Técnico Lisboa, 2015.

COSTA, Valeska Cavalcante Da. **Associação de tratamentos físicos Químicos para remoção de matéria orgânica e cor de chorume e estabilizado produzido no lixão da cidade de Maceió/AL.**, 2010. 82 p. Dissertação (Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento)- Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

COTMAN, M.; GOTVAJN, A. Ž. Comparison of different physico-chemical methods for the removal of toxicants from landfill leachate. **Journal of Hazardous Materials**, v. 178, n. 1–3, p. 298–305, 2010.

DAVIS, Mackenzie. Tratamento de águas para abastecimento e residuárias-princípios e práticas. 1 ed, Elsevier, Rio de Janeiro, 2017.

DE COSTA, P. D.; FURMANSKI, L. M.; DOMINGUINI, L. Produção, Caracterização e Aplicação de Carvão Ativado de Casca de Nozes para Adsorção de Azul de Metileno. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 4, p. 1272–1285, 2015.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica. **Química Nova**, v. 24, n. 6, p. 778–782, 2001.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Reciclagem de Resíduos Agro-Industriais : Cinza de Casca de Arroz como Fonte Alternativa de Sílica. **Cerâmica Industrial**, v. 10, n. 2, p. 22–25, 2005.

DIAS, Poliana dos Santos Dias. **Caracterização dos carvões ativados obtidos a partir da casca do cupuaçu e do caroço do pequi e avaliação do processo de adsorção de azul de metileno em meio aquoso**. 2013. 110f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, ITAPETINGA, 2013.

ELK, Ana Ghislane Henriques Pereira van. Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos: Resução de Emissões na disposição Final. Rio de Janeiro: IBAM, 2007.40p.

Environmental Protection Agency. Landfill Manuals And Landfill Site Design. Ireland: Wexford, 2000.

FERNANDES, R. **Adsorventes alternativos para remoção de fenol em solução aquosa**., 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

FERREIRA, Michel Jean. **Obtenção de silicato de sódio por lixívia Alcalina a partir da cinza da casca de arroz (cinza da casca de arroz) para uso como defloculante**., 2013. p. 85. Dissertação (Mestrado em engenharia química) - Universidade Federal de Santa Catarina para, Florianópolis, 2013.

FERREIRA, Patrícia Arns Steiner. **Remoção de nitrogênio amoniacal de lixiviado de aterro sanitário por processos de adsorção**. 2014. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental)- Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

FERREIRA, P.A.S; SCHEER, A. P; BRAGA, M.C.B. Estudo do equilíbrio da adsorção de nitrogênio amoniacal de lixiviado de aterro sanitário em zeólita. IN: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 20., 2014, Florianópolis, **Anais...** Florianópolis, 2014. p 1-8.

FONSECA, H. C. et al. Uso da cinza da casca de arroz na adsorção de cromo hexavalente. **Cad. Ciênc. Agrá**, v. 8, n. 2447–6218, p. 16–21, 2016.

GARCIA, CAROLINA GIL. **Montagem e operação de unidade de adsorção em leito fixo para remoção de H₂S de corrente gasosa**. 2014. 121 p. Dissertação

(Mestrado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport processes and separation process principles**. Prentice Hall, 2003.

GOMES, Luciana Paulo Gomes (Coord). Resíduos sólidos: **Estudos de Caracterização e Tratabilidade de Lixiviados de Aterros Sanitários para as Condições Brasileiras**. PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. 1 ed, Rio de Janeiro: ABES, 2009. 360p.

HALBERSTADT, K. F. et al. Práticas Sustentáveis Na Destinação Dos Resíduos Resultantes Da Cadeia Produtiva Do Arroz. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 298–312, 2015.

HEYLMANN, Kelly Kathleen Almeida. **Produção , caracterização e aplicação de carvão ativado de caroço de pêssego no tratamento de efluente têxtil**. 2015. 74f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária)- Faculdade de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Pelotas, 2015.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Levantamento Sistemático Da produção agrícola. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/6/lspa_pesq_2017_dez.pdf>. Acesso em: 27 Fev. 2018.

IKHLAQ, A. et al. Methylene Blue removal from Aqueous Solutions by using Rice Husk Ash (RHA) and Peanut Shell Ash (PSA). **Journal of Faculty of Engineering & Technology**, v. 21, n. 3, 2014.

IRGA- Instituto Rio Grandense do Arroz. Ranking 50 maiores do beneficiamento de arroz no estado do Rio Grande Do Sul em 2016. Disponível em <http://www.irga.rs.gov.br/upload/20170602153317ranking_beneficiamento_2016.pdf> . Acesso em: 1 Mar. 2018.

ISMAIL, M. et al. Kinetics of Methylene Blue Adsorption on Sulphuric Acid Treated Coconut (Cocos nucifera) Frond Powder. **American Journal of Environmental Engineering**, v. 5, p. 33–37, 2015.

JORGE, I. R.; TAVARES, F. P.; SANTOS, K. G. Remoção do corante azul de metileno no tratamento de efluentes por adsorção em bagaço de cana de açúcar. IN: XXXVII ENEM Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 37., 2015. São Carlos. **Anais...**São Carlo: Universidade de São Carlos, 2015.

JUNIOR, Armando Borges de Castilhos (Coord). Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte. **PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico**. 1 ed, Rio de Janeiro: ABES, 2003. 294p.

JUNIOR, E.F.DE. O; FREIRE, R.S. Os Impactos Ambientais Decorrentes da Produção de Resíduos Sólidos Urbanos e Seus Riscos à Saúde Humana. **Revista Eletrônica da Faculdade José Augusto Vieira**, Ano IV, n. 8, p. 158-171, set. 2013.

KAMARUDDIN, M. A. et al. Sustainable treatment of landfill leachate. **Applied Water Science**, v. 5, n. 2, p. 113–126, 2015.

KAWAHIGASHI, F. et al. Pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário com carvão ativado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 235–244, 2014.

KEHL, Cibele Cristina Pinto Lauxen. **Remoção de nitrogênio amoniacal por adsorção em carvão ativado**. 2015. 33f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Química) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

LAUERMANN, Andressa. **Caracterização química dos efluentes gerados pelo aterro controlado de santa maria e retenção de chumbo e zinco por um argissolo da depressão central do Rio Grande do Sul**. 2007. p. 72. Dissertação (Mestre em Ciência do Solo) -Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

LE VAN, K.; LUONG THI, T. T. Activated carbon derived from rice husk by NaOH activation and its application in supercapacitor. **Progress in Natural Science: Materials International**, v. 24, n. 3, p. 191–198, 2014.

LEVY, J.Q. & Cabeças, A.J. (2006). Resíduos Sólidos Urbanos – Princípios e Processos. Lisboa: AEPSA

LIMA, P. G. et al. Avaliação de um aterro sanitário por meio do índice de qualidade de respsduos sólidos. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 11, n. 1, p. 88–106, 2017.

LINHARES, F. DE A.; MARCÍLIO, N. R.; MELO, P. J. Estudo da produção de carvão ativado a partir do resíduo de casca da acácia negra com e sem ativação química. **Scientia Cum Industria**, v. 4, n. 2, p. 74–79, 2016.

LUZ, A. D. DA. **Aplicação de coluna de adsorção em leito fixo para a remoção de compostos BTX multicomponentes presentes em efluentes petroquímicos**. 2012. 193f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

MARCKMANN, K. **Uso de carvão ativado proveniente da cinza de casca de arroz em tratamento de água e de e fluentes**. 2016. 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Programa de Pós- Graduação em Engenharia Urbana e Ambianta, Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

MORAES, C. A. et al. Review of the rice production cycle: By-products and the main applications focusing on rice husk combustion and ash recycling. **Waste Management & Research**, v. 32, n. 11, p. 1034–1048, 2014.

MORAVIA, Wagner Guadagnin. **Avaliação do tratamento de lixiviado de aterro sanitário através de processo oxidativo avançado conjugado com sistema de separação por membranas**. 2010. 237f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

MUNIANDY, L. et al. The synthesis and characterization of high purity mixed microporous/mesoporous activated carbon from rice husk using chemical activation with NaOH and KOH. **Microporous and Mesoporous Materials**, 2014

NASCIMENTO, G. C. et al. Caracterização físico-química da cinza de casca de arroz oriunda do processo termelétrico do sul de Santa Catarina - Brasil. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 3, p. 634, 2015.

NASCIMENTO, R.F Do et al. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Copyright, Fortaleza, 2014

NOGUEIRA, Miguel Filipe da Costa. **Novos Eco-Adsorventes para o Pré-Condicionamento do Biogás**. 2017. 66f. Dissertação (Mestrado em Engenharia das Energias Renováveis) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2017.

NORONHA, Patrícia Maria de Souza Paulino Noronha. **Tratamento de lixiviados de aterros sanitários por coagulação e adsorção em conchas calcinadas de bivalves**. 2015. 114f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

OLIVEIRA, Cynara Conceição Neves de. **Estudos de equilíbrio e modelagem cinética da adsorção de corante têxtil “Remazol Black B” sobre bagaço de cana in natura e carvão ativado**. 2003. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)- Universidade Federal De Pernambuco, Recife, 2003.

OLIVEIRA, Paula Sofia Almeida. **Remoção de azul de metileno numa coluna de adsorção com enchimento de casca de noz carbonizada.**, 2009. 70f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Instituto de Desenvolvimento e Inovação Tecnológica Departamento, 2009.

OLIVEIRA, Renata Farias. **Estudo de Adsorção de cromo hexavalente em altas concentrações**. 2013. 80 f. Dissertação (Mestre em engenharia) - Escola De Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ORLANDO, M.L. **Avaliação de desempenho da estação de tratamento de lixiviado da central de tratamento de resíduos da zona da mata – Juiz de Fora/MG**. 2014. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenheiro Ambiental e Sanitarista) - Faculdade de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014.

PERS. Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul. 2014. Disponível em: <<http://www.pers.rs.gov.br/noticias/arq/ENGB-SEMA-PERS-RS-40-Final-rev01.pdf>>. Acesso em: 29 Out. 2017.

PIETRZAK, R. et al. Comparison of the effects of different chemical activation methods on properties of carbonaceous adsorbents obtained from cherry stones. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 92, n. 6, p. 1187–1191, 2014.

PODE, R. Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1468–1485, 2016

POUEY, Maria Tereza Fernandes. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas a produção de cimento composto e/ ou pozolânico**. 2006. 320f. Tese (Doutorado em Engenharia) –Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

QUEIROZ, L. M. et al. Aplicação de processos físico-químicos como alternativa de pré e pós-tratamento de lixiviados de aterros sanitários. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 16, n. 4, p. 403–410, 2011.

REQUE, P.T. **Avaliação da biodegradabilidade de lixiviado de aterro sanitário consorciado com esgoto doméstico em um sistema biológico de tratamento de efluentes**. 2015.169 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

REIS, A. DA S.; SILVA, N. C. DA; NEVES, U. M. Produção de carvão ativado a partir de casca de arroz. **Desafios: Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**, v. 2, p. 89–103, 2015.

RESENDE, Sulamita Mendonça de. **Projeto e construção de um filtro destinado ao Tratamento de efluentes de pequenas tinturarias utilizando materiais de baixo custo**. 2013.81p. Dissertação(Mestrado em Tecnologias para o Desenvolvimento Sustentável) - Universidade Federal de São João Del-Rei,Ouro Branco,2013.

RHEINHEIMER Martin Oscar Witzke. **Remoção de Paracetamol por adsorção em carvão Ativado: Processo em Batelada e Coluna de Leito Fixo**. 2016. 57 f. Trabalho de Conclusão de curso (Bacharel em engenharia química) - Universidade Federal de Rio Grande , Porto Alegre, 2016.

SIDIRAS, D. et al. Dye adsorption on autohydrolyzed pine sawdust in batch and fixed-bed systems. **Chemical Engineering Journal**, v. 171, n. 3, p. 883–896, 2011.

SILVA, Camila Zanoni. **Codigestão Anaeróbia De Lixiviado De Aterro Sanitário E Glicerol**. 2017. 79 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola)- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

SOUTO, G.D'A. DE.B. **Lixiviado de aterros sanitários brasileiros - estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar (“stripping”)**. 2009. 371f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos Gabriel, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

SOUZA, Renata Priscilla de Araújo. **Obtenção De Filtro Cerâmico a Partir Da Diatomita e Casca de Arroz Carbonizada Visando Tratamento de Efluente Têxtil**. 2011. 140f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

SOUZA, Jessica Lara Nunes de. **Influência da taxa de recirculação de lixiviado na degradação de resíduos sólidos urbanos e produção de biogás**. 2014. 71f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenheiro Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2014.

TAUMA, Sílvia Lima. **Testes acelerados em colunas de pequena escala: o uso de carvão ativado granular em projetos de reúso de efluentes de refinarias de petróleo**. 2013.227f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

Trgo, M; Medvidović, N.V; Perić, J. Application of mathematical empirical models to dynamic removal of lead on natural zeolite clinoptilolite in a fixed bed colum. **Indian Journal of Chemical Technology**, v18, pp. 123-131, 2011.

VASQUES, Andressa Regina. **Caracterização e Aplicação de Adsorvente para Remoção de Corantes de Efluentes Têxteis em Batelada e Colunas de Leito Fixo**. 2008. p. 153. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

VOLTAN, P. E. N. et al. Predição da performance de carvão ativado granular para remoção de herbicidas com ensaios em coluna de escala reduzida. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 241–250, 2016.