

Artigo de Revisão


e-ISSN 2177-4560

DOI: 10.19180/2177-4560.v13n12019p118-130


Submetido em: 13 set. 2018

Aceito em: 1 mar. 2019

Estudo de Tratamentos Aplicados a Lixiviado de Aterros Sanitários

Arцelso Maia Limaverde Filho  <https://orcid.org/0000-0002-4263-4672>

Doutor em Ciências – Química Analítica (PUC-Rio). Professor associado da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) Campus Macaé – Macaé/RJ – Brasil. E-mail: arilimaverde@gmail.com.

Luiz André Silva  <https://orcid.org/0000-0002-3722-4820>

Bacharel em Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) Campus Macaé – Macaé/RJ – Brasil. E-mail: lasilva.eq@gmail.com.

Nos dias atuais, muito se discute sobre o grande volume de resíduos sólidos gerados nas grandes cidades e qual a melhor forma de acondicioná-los e de tratar seus subprodutos. Os aterros sanitários são conhecidos por receber grande quantidade e variedade de resíduos sólidos urbanos. Decorrente disto, o chorume (lixiviado) produzido na decomposição desses resíduos possui características peculiares e grande complexidade química, sendo conhecidos também por sua elevada turbidez, cor e odor característicos, além da alta recalcitrância de seus constituintes. Este trabalho teve como objetivo apresentar algumas técnicas utilizadas no tratamento de lixiviados de aterros e avaliar seu desempenho através da aplicação de algumas dessas técnicas. O chorume utilizado foi coletado no aterro de Gericinó (Bangu - Rio de Janeiro). Os tipos de tratamento que serão abordados neste trabalho envolvem processos de coagulação/floculação, adsorção em carvão ativado e filtração por membranas. Foram realizados inicialmente - como etapa de pré-tratamento - os testes em batelada de coagulação, seguidos do processo de adsorção em carvão. Também se verificou o comportamento das amostras filtradas após o pré-tratamento. Ao final dos ensaios, obteve-se um clarificado com demanda química de oxigênio (DQO) até 90% menor, remoção de 97% da absorvância e ausência quase total de turbidez.

Palavras-chave: Aterros sanitários. Tratamento de chorume. Resíduos sólidos.



Estudo de Tratamentos Aplicados a Lixiviado de Aterros Sanitários

Aricelso Maia Limaverde Filho, Luiz André Silva

.....

Study of Applied Treatments for Landfill Leachate

At present, the large volume of solid waste generated in large cities and the best way to pack and treat their by-products has been much discussed. Landfills are known to receive large amounts and types of urban solid waste. As a result, the leachate produced in the decomposition of these residues has peculiar characteristics and great chemical complexity. It is also known for its high turbidity, characteristic color and odor, as well as the high recalcitrance of its constituents. This work aims to present some techniques used in the treatment of landfill leachate and to evaluate its performance by means of the application of some of these techniques. The leachate was collected at the Gericino landfill (at Bangu in the periphery of Rio de Janeiro City). The types of treatment that will be addressed in this work involve coagulation/flocculation processes, activated carbon adsorption and membrane filtration. The coagulation batch tests were performed as a pre-treatment step, followed by the adsorption process in coal. The behavior of the filtered samples after pre-treatment was also verified. At the end of the assays, the chemical oxygen demand (COD) was up to 90% lower, absorbance was removed by 97% and turbidity was almost completely absent.

Keywords: Sanitary landfill. Slurry treatment. Solid waste.

Estudio de Tratamientos aplicados para Lixiviados de Rellenos Sanitarios

En los días actuales, mucho se discute sobre el gran volumen de residuos sólidos generados en las grandes ciudades y cuál es la mejor forma de acondicionarlos y de tratar sus subproductos. Los rellenos sanitarios son conocidos por recibir gran cantidad y variedad de residuos sólidos urbanos. En la mayoría de los casos, el lixiviado producido en la descomposición de estos residuos posee características peculiares y gran complejidad química, siendo conocidos también por su elevada turbidez, color y olor característicos, además de sus constituyentes altamente recalcitrantes. Este trabajo tuvo como objetivo presentar algunas técnicas utilizadas en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios y evaluar su desempeño a través de la aplicación de algunas de esas técnicas. El lixiviado utilizado fue recolectado en el relleno de Gericinó (Bangu - Río de Janeiro). Los tipos de tratamiento que se abordarán en este trabajo involucran procesos de coagulación/floculación, adsorción en carbón activado y filtración por membranas. Se realizaron inicialmente - como etapa de pretratamiento - las pruebas por lotes de coagulación, seguidos del proceso de adsorción en carbón. También se verificó el comportamiento de las muestras filtradas después del pretratamiento. Al final de los ensayos, se obtuvo un aclarado con demanda química de oxígeno (DQO) hasta un 90% menor, remoción del 97% de la absorbancia y ausencia casi total de turbidez.

Palabras clave: Rellenos sanitarios. Tratamiento del lixiviado. Residuos sólidos.

1 Introdução

Com o rápido crescimento dos grandes centros urbanos brasileiros nos últimos anos e o consequente aumento da geração de resíduos sólidos, tem surgido a necessidade de se ampliar cada vez mais a capacidade de disposição e tratamento destes resíduos. E apesar das diversas alternativas existentes para a destinação final dos resíduos sólidos em todo o mundo, no Brasil – que possui grande extensão territorial – esses resíduos são direcionados em sua maioria para aterros controlados, aterros sanitários ou para os vazadouros a céu aberto, também conhecidos como lixões. A precariedade na infraestrutura das cidades aliada à ausência de políticas de educação ambiental, aos altos custos envolvidos e à má gestão pública constituem agravantes para a questão da gestão dos resíduos sólidos e um sério problema ambiental, tornando-se um desafio para as cidades brasileiras no século 21.

Segundo dados da última Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2010), em 2008 foram gerados diariamente mais de 183 mil toneladas de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos, sendo que a falta de um tratamento adequado para esses resíduos pode ocasionar sérios problemas, tanto do ponto de vista ambiental quanto sanitário, como a proliferação de doenças, contaminação do ar e dos solos e de águas subterrâneas e superficiais. Neste contexto, a disposição de resíduos em aterros sanitários tem se mostrado um método de destinação final ambientalmente adequado, alinhado com a realidade brasileira, dado que a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (Lei nº 12.305/10), instituída em 2010, estabeleceu as diretrizes relativas ao gerenciamento dos resíduos sólidos e seus aspectos econômicos, destacando também as responsabilidades dos geradores e do poder público (BRASIL, 2010).

A grande quantidade e variedade de resíduos descartados nos aterros provocam a produção um líquido conhecido como chorume ou lixiviado. Esse líquido é gerado pela biodegradação e pela decomposição físico-química dos rejeitos, juntamente com a percolação das águas pluviais nos aterros. Por suas características peculiares e grande complexidade química, o chorume constitui grande agente poluidor, com a possibilidade de contaminação de solos e demais corpos hídricos (superficiais ou subterrâneos), impactando diretamente a saúde pública. Por causa dessas características, o tratamento dos lixiviados dos aterros são operações complexas, já que suas características físico-químicas dependem de diversos fatores, tais como a composição do lixo aterrado, do índice pluviométrico da região, do grau de compactação e idade do aterro. Geralmente os lixiviados possuem alta concentração de nitrogênio amoniacal e de compostos orgânicos recalcitrantes, como as substâncias húmicas e fúlvicas (FELICI *et al.*, 2013).

Com o aumento da preocupação com a questão ambiental decorrente do descarte de efluentes nos últimos anos, especialmente com as determinações dispostas na resolução 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, complementada pelas resoluções 397/2008 e 430/2011 (BRASIL, 2011), nota-se um grande número de trabalhos sobre o tratamento de chorume. Uma rápida pesquisa na internet retorna uma grande quantidade de artigos, teses e dissertações sobre o tema. Ferreira, Giordano e Ritter (2003) em seu artigo, fazem uma revisão das técnicas de tratamento de lixiviado, abordando a realidade do Rio de Janeiro à época. Telles (2010), em sua dissertação, avaliou o desempenho de diversos processos



Estudo de Tratamentos Aplicados a Lixiviado de Aterros Sanitários

Aricelso Maia Limaverde Filho, Luiz André Silva

no tratamento do lixiviado proveniente do Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) de Nova Iguaçu, no estado do Rio de Janeiro. Silva (2009), Albuquerque (2012) e Felici e colaboradores (2013) estudaram a combinação de diversas técnicas de tratamento associadas a processos biológicos no tratamento de lixiviados. E a combinação de várias técnicas no tratamento desse tipo de efluente tem se mostrado uma alternativa necessária, dada a difícil tarefa que é estabelecer uma via única que vise atender a todos os parâmetros previstos nas resoluções mencionadas. Algumas técnicas empregadas no tratamento de chorume são a recirculação do chorume no aterro, processos biológicos, coagulação/floculação, processo de filtração por membranas, adsorção, precipitação química e processos oxidativos. A escolha dos melhores processos irá depender das características do chorume e podem determinar sua maior ou menor eficiência. Algumas destas técnicas serão abordadas neste trabalho.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da Norma Brasileira Registrada (NBR) nº 10.004, de 31 de maio de 2004, define os resíduos sólidos como os

[...] resíduos nos estados sólidos e semissólido que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola e de serviços de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível. (ABNT, 2004, p.1).

Segundo esta NBR, os resíduos sólidos podem ser classificados de acordo com sua periculosidade, como perigosos (classe I) ou não perigosos (classes II-A e II-B):

- **Resíduos de Classe I – Perigosos:** são aqueles que possuem uma ou mais das seguintes características: patogenicidade, toxicidade, inflamabilidade, reatividade e corrosividade. Este tipo de resíduo, devido a estas características, pode apresentar riscos à saúde pública e/ou ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada. São exemplos de resíduos de classe I os resíduos industriais e hospitalares.
- **Resíduos de Classe II-A – Não Perigosos (Não Inertes):** são os resíduos sólidos que podem apresentar biodegradabilidade, combustibilidade, ou solubilidade em água como características. Enquadram-se nessa classe os resíduos sólidos urbanos (RSU).
- **Resíduos de Classe II-B – Não Perigosos (Inertes):** são resíduos sólidos que quando submetidos ao teste de solubilização não apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se os padrões: espectro, cor, turbidez e sabor. Nessa categoria enquadram-se os resíduos de demolição e construção, tais como madeira e vidro.

A definição de resíduos sólidos urbanos (RSU), segundo a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 404, de 11 de novembro de 2008, em seu Art. 3º, abrange os resíduos sólidos domiciliares, resíduos sólidos de serviços de limpeza urbana, resíduos sólidos de serviços de saúde, resíduos sólidos de pequenos estabelecimentos comerciais, industriais e de prestação de serviços, desde que possuam características semelhantes aos resíduos gerados em domicílios. Neste caso estão excluídos os resíduos perigosos.

Estudo de Tratamentos Aplicados a Lixiviado de Aterros Sanitários

Aricelso Maia Limaverde Filho, Luiz André Silva

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, Lei nº 12.305/2010) reúne um conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações a serem adotados pelo Governo Federal em parcerias com as prefeituras, com os Estados ou com a iniciativa privada, visando à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos. E para efeito desta Lei, além da classificação quanto à periculosidade, os resíduos sólidos também diferem quanto a sua origem, sendo classificados como:

- **Resíduos domiciliares:** aqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas.

- **Resíduos de limpeza urbana:** os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana. Os resíduos domiciliares e de limpeza urbana constituem os chamados resíduos sólidos urbanos (RSU).

A classificação dos resíduos é relevante para a escolha da estratégia de gerenciamento mais viável. Os tratamentos têm por objetivo reduzir a periculosidade do resíduo, enquanto o armazenamento procura estocar o resíduo de maneira segura, evitando seu contato direto com o meio ambiente e as pessoas. Atualmente, o método de tratamento de resíduos sólidos urbanos mais utilizado e que apresenta menor custo, consiste em sua estocagem no solo por intermédio da técnica de aterros sanitários (POVINELLI; ALÉM SOBRINHO, 2009).

Se comparado aos países desenvolvidos, a aplicação das modernas formas de disposição final de resíduos sólidos aconteceu tardiamente no Brasil. A ABNT emitiu sua primeira norma regulamentadora para a disposição de resíduos sólidos urbanos somente em meados da década de 80, com a NBR 8.849/85.

Neste contexto, os vazadouros a céu aberto (lixões) continuam sendo o principal destino final dos resíduos sólidos nas cidades brasileiras, conforme revelou a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico PNSB (2008). Embora esse quadro venha se modificando nos últimos anos, são necessárias soluções urgentes para esse setor, dado que os lixões são uma realidade e configuram um meio notadamente inadequado para disposição final de RSU. Contudo, independentemente de quais soluções e/ou combinações de soluções sejam discutidas e implantadas, isso certamente irá requerer mudanças sociais, econômicas e culturais da sociedade (IBGE, 2010). A Tabela 1 mostra o destino final dos RSU no Brasil de acordo com o PNSB de 2008.

Tabela 1. Destino final dos RSU, por unidade de destinação

Ano	Destinação final dos resíduos sólidos (%)		
	Vazadouros a céu aberto	Aterros controlados	Aterros sanitários
1989	88,2	9,6	1,1
2000	72,3	22,3	17,3
2008	50,8	22,5	27,7

Fonte: IBGE (2010)

Diferentemente do biogás gerado nos aterros, o qual pode ser drenado através de tubulações e encaminhado para queima ou reaproveitamento, o lixiviado ou chorume, que é o resultado do processo de infiltração da água pela cobertura do solo de um aterro, é definido como o líquido proveniente de três principais fontes: da umidade natural dos resíduos sólidos; da água

Estudo de Tratamentos Aplicados a Lixiviado de Aterros Sanitários

Aricleso Maia Limaverde Filho, Luiz André Silva

de constituição dos diferentes materiais que sobram durante o processo de decomposição e dos materiais orgânicos através das enzimas expelidas pelas bactérias (REICHERT, 2000).

O chorume também pode ser caracterizado como uma solução aquosa de elevada carga orgânica e de forte coloração proveniente da decomposição química e microbiológica dos resíduos depositados sobre o aterro. Sua extrema complexidade química se deve à presença de quatro tipos distintos de poluentes: material orgânico dissolvido (ácidos carboxílicos voláteis e ácidos húmicos e fúlvicos), macrocomponentes inorgânicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), metais pesados (Cd^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+}) e compostos orgânicos xenobióticos (CHRISTENSEN *et al.*, 2001). Toda essa heterogeneidade torna bastante complexa a caracterização dos efluentes gerados nessas condições.

2 Material e Métodos

Este estudo fez parte de um projeto de iniciação científica e buscou avaliar a utilização de processos físicos (adsorção e filtração) e físico-químicos (coagulação-floculação) no tratamento do lixiviado proveniente do Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) de Gericinó, localizado na cidade do Rio de Janeiro. Atualmente esse aterro encontra-se desativado.

Inicialmente avaliou-se a utilização do processo físico-químico de coagulação/floculação como pré-tratamento do chorume. A partir das melhores condições encontradas, seguiu-se para a etapa de pós-tratamento com carvão ativado. Para medir a eficácia dos tratamentos, foram avaliados os parâmetros de remoção absorvância a 254 nm (cor) e demanda química de oxigênio (DQO).

O chorume bruto foi acondicionado em galões de 20 L e mantidos a temperatura ambiente. Para a caracterização do lixiviado bruto foram analisados os seguintes parâmetros: absorvância, turbidez, DQO, COT (carbono orgânico total), pH, sólidos totais, cloreto, nitrogênio amoniacal e alcalinidade total. No pós-tratamento foram analisados também absorvância, turbidez e DQO.

A etapa inicial dos experimentos consistiu na realização de testes de coagulação/floculação utilizando os sais hidratados de cloreto férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, marca VETEC – teor: 97%) e sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot (14-18)\text{H}_2\text{O}$, marca VETEC – teor: 98-102%). Uma vez estabelecida a condição ótima do processo, foi realizada a etapa seguinte: o pós-tratamento com carvão ativado. Em seguida, foram avaliadas a remoção de absorvância e DQO.

No processo de coagulação/floculação, foram realizados testes de jarro (“jar tests”) em bécheres de 600 mL, adicionando-se uma quantidade preestabelecida de coagulante (a depender da condição estudada) em 300 mL de chorume sob agitação rápida. O pH foi então ajustado para a faixa desejada e o sistema mantido em agitação lenta de 20 s^{-1} (30 rpm) por 20 minutos. Em seguida, o sistema era mantido em decantação por mais 20 minutos. Depois, uma amostra era coletada para as análises de parâmetros como absorvância e DQO.

Na etapa de adsorção em carvão ativado quantidades preestabelecidas de carvão ativado, de granulometria aproximada de 44 μm , foram adicionadas a alíquotas de 100 mL do chorume pré-tratado em frascos *erlenmeyer* de 250 mL. Esse sistema era mantido por duas horas e ao final

Estudo de Tratamentos Aplicados a Lixiviado de Aterros Sanitários

Aricelso Maia Limaverde Filho, Luiz André Silva

.....
uma amostra era recolhida, filtrada em sistema de filtração a vácuo (com membranas *micropore* de 0,45µm) para eliminação do carvão residual e separada para caracterização.

A determinação do pH foi realizada através do método potenciométrico, com a utilização de medidor de pH (pHmetro Quimis, Q-400M) calibrado previamente, conforme procedimento descrito no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005).

Nos testes de turbidez realizados, utilizou-se um turbidímetro da marca Digimed, modelo DM-TU, calibrado conforme procedimento descrito no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005).

A presença de cor em efluentes é um indicativo da existência de compostos solúveis. No caso específico dos lixiviados de aterros, sua cor característica pode ser atribuída à influência de compostos orgânicos solúveis, principalmente das substâncias húmicas. Neste contexto, serve como um importante parâmetro para avaliar a existência de componentes aromáticos como partes significativas dos constituintes do chorume. As análises de cor apresentadas neste trabalho foram realizadas medindo a absorbância em comprimento de onda de 254 nm, em um espectrofotômetro Shimadzu, modelo UV-Mini – 1240, conforme descrito no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005).

O teor de cloreto foi determinado através do método de Mohr, que consiste na titulação de íons cloreto presentes na amostra com uma solução padronizada de nitrato de prata.

A demanda química de oxigênio (DQO) foi determinada pelo método colorimétrico, descrito no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005). A oxidação foi conduzida durante duas horas no digestor a T=150°C. Após o resfriamento da amostra até temperatura ambiente, foi feita a leitura espectrofotométrica da solução. Foi utilizado um termodigestor de DQO da marca HACH, modelo 45600 para a digestão das amostras em refluxo fechado e um espectrofotômetro para análise na região do visível da marca HACH, modelo DR-2800 para leitura da absorbância. As análises foram realizadas em triplicata. Como a reação é catalisada por íons de prata, a presença de cloreto em solução tem grande influência no resultado da DQO, fazendo com que todas as amostras precisassem ser diluídas na razão 1:4.

Para a análise de sólidos totais, alíquotas de 20 mL (em triplicata) de amostra foram submetidas em um cadinho de porcelana, previamente tarado, à estufa por 103 – 105 °C até peso constante. Em seguida, pesou-se o cadinho contendo o sólido e seu valor subtraído do peso do cadinho vazio, determinando assim a massa de sólidos totais na amostra. A análise de alcalinidade total foi realizada pelo método titulométrico em triplicata. Um volume de 100 mL de amostra foi titulado com uma solução de ácido sulfúrico 0,01 mol.L⁻¹ até o pH de 4,5. As amostras foram diluídas (em 5x) para facilitar a análise, e os resultados expressos em ppm de CaCO₃.

O nitrogênio amoniacal foi determinado através do método do eletrodo íon-seletivo, utilizando um eletrodo da marca *Thermo Electron*, modelo Orion 9512, em equipamento *Thermo Electron Corporation*, modelo Orion 4 Star pH-ISE *Portable*. Para calibração foram usadas soluções de NH₄Cl na faixa de concentração entre 14 e 1.400 ppm. Para ajuste da força iônica empregou-se a metodologia de adição de padrão de amônia pela adição de 0,4 mL de solução “ISA” da marca *Thermo* (íon-seletivo análise) Orion 951211, a cada alíquota de 20 mL dos padrões e das amostras (em triplicata).

Estudo de Tratamentos Aplicados a Lixiviado de Aterros Sanitários

Aricleso Maia Limaverde Filho, Luiz André Silva

3 Resultados e Discussão

Os valores dos parâmetros obtidos na caracterização do chorume bruto e os resultados presentes em outros estudos envolvendo o tratamento deste tipo de efluente podem ser observados na Tabela 2. Cabe ressaltar que, com a exceção dos ensaios com o chorume estudado por Telles (2010), os demais foram realizados com lixiviados a partir de uma única amostragem.

Tabela 2. Valores dos parâmetros obtidos na caracterização do chorume bruto e os resultados presentes em outros estudos

PARÂMETRO	RESULTADO	FREIRE, 2010	CHEIBUB, 2009	TELLES, 2010
Origem	Gericinó, RJ	Gericinó, RJ	Gramacho, RJ	N. Iguaçu, RJ
pH	8	8,3	8,33	7,7
Turbidez (UNT)	21,6	27,7	89	32,1
Absorbância (254 nm)	2,71	-	19,2	-
DQO (mg L ⁻¹)	2300	1714	2460	4178
DBO ₅ (mg L ⁻¹)	-	165	30	787
DBO ₅ /DQO	-	0,1	0,012	0,3
Cl (mg L ⁻¹)	2751,3	2677	-	2090
Sólidos Totais (mg L ⁻¹)	5865	5865	-	-
COT (mg L ⁻¹)	550	548	-	-
[N-NH ₄] (mg L ⁻¹)	871,2	858	-	2001
Alc. Total (mg L ⁻¹)	5533,3	-	-	-

Fonte: SILVA (2017)

Os dados da Tabela 2 apontam para a elevada presença de componentes dissolvidos e em suspensão nos lixiviados provenientes do aterro de Gericinó, evidenciado pelos altos teores de cloreto, sólidos totais e alcalinidade total. Altas concentrações de cloreto podem prejudicar a remoção da matéria orgânica e nitrogênio amoniacal por processos biológicos, além de interferir no resultado de testes analíticos como o de DQO (APHA, 2005). Também se verifica que esse lixiviado possui elevada carga orgânica e toxicidade, evidenciados pelos valores de DQO, Carbono Orgânico Total (COT) e nitrogênio amoniacal (N-NH₄) e que também confirmam sua recalcitrância e baixa biodegradabilidade (baixa relação DBO₅/DQO).

Semelhantemente, o lixiviado proveniente do aterro de Gramacho também possui elevada carga orgânica não biodegradável, dado seu baixíssimo valor para a razão DBO₅/DQO, o que corrobora sua condição de aterro maduro, dado que ele existe há quase 40 anos. Fator importante e que deve ser destacado nesta análise é o alto valor de absorbância, que chega a ser sete vezes superior ao valor encontrado para o chorume estudado neste trabalho. Tal fato pode ser explicado pela forte coloração escura desse tipo de efluente, aliado ao alto valor de turbidez encontrado, o que pode dificultar a leitura espectrofotométrica. Além da elevada toxicidade dos lixiviados, pode-se perceber como um fator comum a todos o seu pH alcalino, característico de chorumes na fase de decomposição metanogênica (LO, 1996).

O lixiviado coletado no Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) de Nova Iguaçu, no estado do Rio de Janeiro, também possui elevada DQO e baixa relação DBO₅/DQO. Mas

Estudo de Tratamentos Aplicados a Lixiviado de Aterros Sanitários

Aricleso Maia Limaverde Filho, Luiz André Silva

diferentemente dos lixiviados citados anteriormente, os dados de caracterização do chorume estudado por Telles sugerem tratar-se de um aterro jovem (relação DBO_5/DQO igual a 0,3), o que é verdade, já que este CTR iniciou suas operações em 2003 (TELLES, 2010).

3.1 Influência do pH do meio

O pH possui um importante papel no processo de coagulação/floculação. Em função disso, foram realizados testes variando o pH de 4 a 8 para os dois tipos de coagulantes, a uma concentração inicial fixa de 500 mg L^{-1} . Os resultados iniciais mostraram a melhor condição com a remoção de mais de 26% da DQO, utilizando o cloreto férrico, em pH 4,0. Nestas condições, foi possível ainda remover cerca de 35% da turbidez.

O teste utilizando o sulfato de alumínio promoveu uma maior remoção de DQO em pH 5,0, com percentual aproximado de 19% de redução. Em relação à turbidez, o efluente tratado nestas condições apresentou um sobrenadante bastante turvo, com valor residual de 86,2 UNT, um aumento de quase 300% no valor de turbidez, sugerindo que o mecanismo de coagulação predominante foi o de adsorção-desestabilização, uma vez que no mecanismo de varredura, os flocos gerados são maiores e mais facilmente sedimentáveis. Queiroz *et al.* (2011) também encontraram melhores condições operacionais em pH igual a 4,0 utilizando cloreto férrico e pH igual a 5,0 com sulfato de alumínio.

Ao avaliar a cor final do efluente tratado, as melhores condições de remoção também foram verificadas nos valores de pH entre 4,0 e 5,0, respectivamente, tendo o cloreto férrico apresentado um percentual de remoção de 11,1% frente aos 4,5% do sulfato de alumínio. Cabe ressaltar que as condições iniciais de processo envolveram a utilização de 500 mg L^{-1} de coagulante. A Tabela 3 traz os resultados destes experimentos.

Tabela 3. Resultados obtidos de DQO, turbidez e absorvância

Condição	DQO (mg L^{-1})		Turbidez (UNT)		Absorvância (254 nm)	
	Cloreto Férrico	Sulfato de Alumínio	Cloreto Férrico	Sulfato de Alumínio	Cloreto Férrico	Sulfato de Alumínio
Bruto	2300		21,6		2,71	
pH=4	1697	2121	14	79,5	2,41	2,65
pH=5	2087	1863	7,7	86,2	2,49	2,59
pH=6	2118	2257	85	61,9	2,71	2,71
pH=7	2239	2202	13,6	20,3	2,65	2,71
pH=8	2273	2228	17,8	14	2,71	2,71

Fonte: SILVA (2017)

A melhor condição de pH encontrada nos testes com cloreto férrico confirma os resultados obtidos em outros estudos, onde foram observadas condições ótimas de pH na faixa entre 4,0 e 5,0. Castrillón *et al.* (2010) obtiveram remoção de 73% da DQO do lixiviado de um aterro maduro em pH 5,0, enquanto Bila *et al.* (2005), em outro estudo, conseguiram remover



Estudo de Tratamentos Aplicados a Lixiviado de Aterros Sanitários

Aricelso Maia Limaverde Filho, Luiz André Silva

até 43% da DQO na faixa de pH entre 4 e 5. Ntampou, Zouboulis e Samaras (2006), por sua vez, conseguiram remover 72% da DQO e 98% da cor verdadeira utilizando o coagulante em pH 4,5.

Em relação à utilização do sulfato de alumínio como agente coagulante no tratamento de lixiviado de aterros, foram encontrados poucos estudos a respeito. Entretanto, em alguns trabalhos consultados, observou-se que as melhores condições operacionais ocorriam em valores de pH superiores a 5,0. Nos ensaios de coagulação/floculação realizados por Marañón *et al.* (2008) com lixiviado de um aterro com poucos anos de operação, foi atingida eficiência de remoção de DQO de 20%, em pH 6,0. Telles (2010), em seus estudos, obteve o percentual máximo de 15% de remoção, em pH 7,5.

3.2 Influência da concentração de coagulante

Na etapa seguinte de testes, buscou-se avaliar a concentração que proporcionasse uma maior eficiência no processo. Os ensaios foram conduzidos variando as concentrações de coagulante em 200, 400, 800, 1.000, 1.500 e 2.000 mg L⁻¹, considerando a condição inicial de pH fixada em 4,0 para o cloreto férrico. Em função dos resultados obtidos com o sulfato de alumínio, os testes prosseguiram somente com o cloreto férrico.

Os ensaios seguintes apresentaram os melhores resultados na concentração de 1.500 mg L⁻¹ de coagulante. Nesta condição foi possível remover 77% da DQO e 67,4% da absorvância do efluente. Em seu trabalho, Cheibub (2009) conseguiu remover 57% de DQO e 71% de cor em pH 4,0, utilizando uma concentração de cloreto férrico de 1.667 mg L⁻¹. Ntampou, Zouboulis e Samaras (2006) removeram 72% de DQO e 98% de cor utilizando 1.890 mg L⁻¹ de coagulante em pH 4,5. A Tabela 4 mostra os resultados de DQO para os testes com cloreto férrico.

Tabela 4. Resultados de remoção de DQO para os testes com cloreto férrico

Conc. FeCl ₃ (ppm)	DQO (mg L ⁻¹)	% Remoção
200	1835	20,2
400	1716	25,4
800	1019	55,7
1000	831	63,9
1500	529	77,0
2000	554	75,9

Fonte: SILVA (2017)

Após o tratamento nas condições operacionais otimizadas anteriormente, o efluente passou por um sistema de filtração a vácuo utilizando membranas de acetato de celulose de 0,45 µm de diâmetro de poro. O objetivo era analisar a influência da microfiltração na eliminação de cor e DQO do efluente tratado. A solução resultante apresentou um aumento de 1,9% na remoção da DQO, passando a 78,9%. Já a cor apresentou um percentual de remoção de 75,2%.

Estudo de Tratamentos Aplicados a Lixiviado de Aterros Sanitários

Aricelso Maia Limaverde Filho, Luiz André Silva

3.3 Ensaios com Carvão Ativado

Com os resultados das condições ótimas verificadas nos ensaios de coagulação/floculação com o cloreto férrico, o estudo prosseguiu com o pós-tratamento do lixiviado com adsorção em carvão ativado. Os testes foram realizados com massas variadas de carvão, considerando as concentrações finais de 0,1, 0,2, 0,5, 1,0, 2,5 e 5,0 g de carvão por litro de efluente tratado. Nessas condições a maior remoção de DQO ocorreu no *erlenmeyer* contendo 5,0 g carvão L⁻¹, com um percentual de 89,7%. No entanto, a remoção não foi tão superior àquela verificada utilizando a metade da massa de carvão. No ensaio utilizando a concentração 2,5 g L⁻¹, a remoção foi de 89,4%, ou seja, 0,3% menor. Na análise de remoção de absorvância, os resultados foram bastante significativos. Houve a remoção de 97,1% de absorvância na maior quantidade de carvão utilizada. Porém, em relação ao teste com 2,5 g de carvão, o ganho não foi tão expressivo, uma vez que o percentual de remoção nessas condições foi de 96,4%. Para efeito de comparação, Kawahigashi *et al.* (2014), ao tratar o lixiviado proveniente do aterro da cidade de Rolândia no Paraná, aplicou a adsorção em carvão ativo (granular) como etapa final de um tratamento que envolveu a remoção de amônia por arraste com ar, seguido do tratamento com lodos ativados e da coagulação/floculação com cloreto férrico. Seus resultados mostraram uma remoção de até 100% da cor e 76% da DQO.

4 Conclusões

Como tratamento primário, o processo de coagulação/floculação com cloreto férrico demonstrou-se bastante satisfatório, pois conseguiu promover a remoção de até 77% da DQO e 67% da absorvância (254 nm) do chorume. Em seus trabalhos com lixiviados de aterros, Aziz *et al.* (2006), Wang *et al.* (2002), Tatsi *et al.* (2003) e Ntampou, Zouboulis e Samaras (2006) também obtiveram boas remoções de cor e DQO. No entanto, somente esse tipo de tratamento, mesmo naqueles estudos onde houve a utilização de auxiliares de floculação, não se demonstrou suficiente para a remoção de toda matéria orgânica recalcitrante.

Na faixa de pH ácida nos ensaios de coagulação/floculação, verificou-se um melhor desempenho do cloreto férrico frente ao sulfato de alumínio. Trabalhos como os de Aziz *et al.* (2006) e Maraño *et al.* (2008) apontaram neste mesmo sentido, confirmando a maior eficiência do sal férrico. No entanto, é importante destacar que o cloreto férrico possui um custo mais elevado que o sulfato de alumínio.

O processo de microfiltração que se seguiu ao tratamento físico-químico, não se demonstrou muito eficiente, uma vez que houve remoção de apenas 1,9% de DQO e 7,8% de absorvância, o que pode ser explicado pela presença de material em suspensão decorrente do processo no efluente tratado.

Os ensaios com carvão ativado promoveram a remoção de quase 90% de DQO do efluente tratado, com um valor de DQO residual de aproximadamente 296 mg L⁻¹ O₂. Em relação à cor, o clarificado apresentou redução de mais de 97% da absorvância, atingindo um aspecto transparente e límpido, já que a amostra apresentou praticamente ausência de turbidez

Estudo de Tratamentos Aplicados a Lixiviado de Aterros Sanitários

Aricleso Maia Limaverde Filho, Luiz André Silva

($< 1,0$ UNT). A cor final e a DQO residual do lixiviado apontam para uma eficiente remoção das substâncias húmicas e fúlvicas.

O estudo também mostrou que a utilização de $5,0$ g carvão L^{-1} de efluente pré-tratado não ofereceu ganhos significativos de eficiência em relação àquele tratado com $2,5$ g L^{-1} .

Referências

ALBUQUERQUE, E. M. *Avaliação do tratamento combinado de lixiviado de aterro sanitário e esgoto sanitário em sistemas de lodos ativados*. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. 278 p.

APHA. AWWA. WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21th ed. [S. l.], 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. *NBR 10004: Resíduos Sólidos Classificação*. Rio de Janeiro, 2004. p. 1.

AZIZ, A. A. *et al.* Colour removal from landfill leachate by coagulation and flocculation processes. *Bioresource Technology*, v. 98, n. 1, p. 218-220, Jan. 2006.

BILA, D.M. *et al.* Ozonation of a landfill leachate: evaluation of toxicity removal and biodegradability improvement. *Journal of Hazardous Materials*, v. 117, n. 2-3, p. 235-242, 31 January 2005.

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, 3 ago. 2010. Seção 1, p. 3. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 2018.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Ministério do Meio Ambiente. *Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011*. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>.

CASTRILLÓN, L. *et al.* Physico-chemical and biological treatment of MSW landfill leachate. *Waste Management*, v. 30, p. 228-235, 2010.

CHEIBUB, A. F. *Utilização da coagulação/Floculação e processos oxidativos avançados no tratamento de lixiviado de aterro sanitário estabilizado*. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

CHRISTENSEN, T. *et al.* Biogeochemistry of Landfill Leachate Plumes. *Applied Geochemistry*, v. 16, p. 659-718, 2001.

FELICI, E. M. *et al.* Remoção de carga orgânica recalcitrante de lixiviado de resíduos sólidos urbanos pré-tratado biologicamente por coagulação química-floculação-sedimentação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27., 2013. p. 177-184.

FERREIRA, J. A.; GIORDANO, G.; RITTER, E. Revisão das técnicas de tratamento de chorume e a realidade do Estado do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2013, Joinville. *Anais [...]*. Joinville, SC: ABES, 2003.



Estudo de Tratamentos Aplicados a Lixiviado de Aterros Sanitários

Aricleso Maia Limaverde Filho, Luiz André Silva

IBGE. *Pesquisa nacional de saneamento básico 2008*. Rio de Janeiro, 2010. 219 p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv45351.pdf>. Acesso em: 2018.

KAWAHIGASHI, F. *et al.* Pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário com carvão ativado. *Eng. Sanit. Ambient.* [online], v. 19, n. 3, p. 235-244, 2014.

LO, I. M. Characteristics and Treatment of Leachates from Domestic Landfills. *Environment International*, v. 22, n. 4, p. 433-442, 1996.

MARAÑÓN, E. *et al.* Coagulation-flocculation as a pretreatment process at a landfill leachate nitrification-desnitrification plant. *Journal of Hazardous Materials*, v. 156, p. 538-544, 2008.

NTAMPOU, X.; ZOUBOULIS, A. I.; SAMARAS, P. Appropriate combination of physico-chemical methods (coagulation/flocculation and ozonation) for the efficient treatment of landfill leachates. *Chemosphere*, v. 62, n. 5, p. 722-730, Feb. 2006.

POVINELLI, J.; ALÉM SOBRINHO, P. Introdução. In: GOMES, L. P. (coord.). *Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras*. Rio de Janeiro: ABES, 2009. p. 19-25. (Projeto PROSAB; Resíduos sólidos, 3). Disponível em: https://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/prosab5_tema_3.pdf. Acesso em: 2018.

QUEIROZ, L. M. *et al.* Aplicação de processos físico-químicos como alternativa de pré e pós-tratamento de lixiviados de aterros sanitários. *Eng. Sanit. Ambient.* [online], v. 16, n. 4, p. 403-410, 2011.

REICHERT, G. A. *Aterro sanitário, projeto, implantação e operação*. Porto Alegre: ABES, 2000.

RIO DE JANEIRO (Cidade). Secretaria Municipal de Meio Ambiente. Secretaria Municipal de Conservação e Serviços Públicos. Companhia Municipal de Limpeza Urbana. *Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PMGIRS da Cidade do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, RJ. 2015. 71 p.

SILVA, F. B. *Tratamento Combinado de Lixiviados de Aterros Sanitários*. 2009. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - EQ/UFRJ, 2009.

SILVA, L. A. *Estudo de Tratamentos Aplicados a Lixiviado de Aterros Sanitários*. 2017. 67 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação Bacharel em Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, campus Macaé, 2017.

TATSI, A. A. *et al.* Coagulation-flocculation pretreatment of sanitary landfill leachates. *Chemosphere*, v. 53, n. 7, p. 737-744, Nov. 2003.

TELLES, C. A. S. *Processos Combinados para o Tratamento de Lixiviado de Aterro Sanitário*. 2010. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.

WANG, Z. *et al.* Landfill leachate treatment by a coagulation-photo oxidation process. *Journal of Hazardous Materials*, v. 95, n. 1-2, p. 153-159, 11 Nov. 2002.