

II-009 - APLICAÇÃO E PRÉ-DIMENSIONAMENTO DO PROCESSO DE ARRASTE DE AMÔNIA COMO PRÉ-TRATAMENTO DE LIXIVIADOS DE ATERROS SANITÁRIOS

Ramiro Gonçalves Etcchepare⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental pela Universidade Luterana do Brasil. Mestre e Doutor em Tecnologia Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Professor da Universidade Federal do Paraná (UFPR), junto ao Departamento de Hidráulica e Saneamento (DHS) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA).

Matheus Müller Arsego.

Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Maurício Yukio Yamanari Nagashima

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Julio Cezar Rietow

Engenheiro Ambiental pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela PUCPR. Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental PPGERHA na Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Miguel Mansur Aisse

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Mestre em Engenharia Civil - Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (USP). Doutor em Engenharia Civil - Engenharia Hidráulica pela Universidade de São Paulo. Professor da Universidade Federal do Paraná (UFPR), junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA).

Endereço⁽¹⁾: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Campus Centro Politécnico, Setor de Tecnologia, Bloco V, Jardim das Américas – Curitiba/PR, CEP: 81531-990, Tel.: +55 (41)3361-3144, e-mail: ramiro.etcchepare@ufpr.br

RESUMO

A produção de resíduos sólidos urbanos tem se tornado cada vez mais intensa devido ao elevado crescimento populacional, estilo de vida e padrão de consumo nos grandes centros urbanos. Embora os aterros sanitários representem uma solução viável para a disposição final desses resíduos, essa configuração acarreta a produção do lixiviado, cuja existência pressupõe a necessidade de tratamento e disposição final. Uma das soluções para este problema seria o tratamento em conjunto do lixiviado com o esgoto sanitário em estações de tratamento de esgotos que operam com reatores anaeróbios do tipo UASB. Tendo em vista que o fator que mais contribui para a toxicidade do lixiviado é a sua alta concentração de nitrogênio amoniacal e que este é um dos fatores limitantes da sua co-disposição em reatores UASB, supõe-se que a remoção parcial ou total deste composto implique em uma maior carga admissível de lixiviado a ser co-disposto juntamente com o esgoto sanitário. Dentre os processos físico-químicos utilizados para remoção de nitrogênio amoniacal, o arraste mecânico com ar tem se destacado por suas altas taxas de remoção, bem como seus custos reduzidos de operação e manutenção. O presente trabalho buscou contribuir para a resolução desse problema no sentido de auxiliar gestores de aterros sanitários e outras partes interessadas em tomadas de decisão. Os objetivos do trabalho foram estudar o processo de arraste com ar, em escala de bancada, e avaliar a viabilidade econômica da aplicação do processo em escala real, mediante um pré-dimensionamento do sistema de tratamento. Foram delineados 18 cenários com condições operacionais distintas, que abrangeram os materiais constituintes dos tanques a serem utilizados, cidades com diferentes portes (populações) e a utilização ou não de alcalinizante para aumentar a cinética de remoção de amônia. A comparação desses cenários levou à constatação de um maior potencial de utilização do processo sem a utilização de alcalinizante. Concluiu-se também que para cidades de pequeno e médio porte (com até 50.000 hab.), o arraste como pré-tratamento do lixiviado é um processo economicamente viável, enquanto que para cidades grandes (com mais de 500.000 hab.), o processo se torna mais vultuoso.

PALAVRAS-CHAVE: Avaliação econômica, Lixiviado de aterro sanitário, Reator UASB, Tanque de Arraste.

INTRODUÇÃO

A produção de resíduos tem se tornado cada vez mais intensa devido ao elevado crescimento populacional e ao estilo de vida corrente nos grandes centros urbanos. Uma das soluções mais empregadas atualmente é a disposição desses resíduos em aterros sanitários. Embora representem uma solução viável e mais adequada para a disposição final desses resíduos, em relação a alternativas como lixões a céu aberto e aterros controlados, por exemplo, a percolação da água da chuva através da massa de resíduos neles disposta gera um líquido escuro e de alto potencial poluidor denominado lixiviado, cuja existência por si só pressupõe a necessidade de tratamento e disposição final.

O lixiviado é caracterizado por ser uma matriz aquosa de extrema complexidade, com alto teor de nitrogênio e elevada carga orgânica, que se não tratado e disposto de maneira adequada possui o potencial de causar danos ambientais nas formas de eutrofização, morte da biota aquática e redução da concentração de oxigênio dissolvido. Também representa riscos à saúde pública, no sentido de causar problemas crônicos devido à possível ingestão contínua de patógenos (Silva, 2009; Rodrigues, 2004).

Dentre as técnicas de tratamento do lixiviado utilizadas atualmente, tais como lodos ativados, *wetlands* e processos anaeróbios (Cornelli *et al.*, 2014) a co-disposição com o esgoto sanitário, em estações de tratamento de esgoto, tem se destacado como uma alternativa eficaz, atingindo eficiências de remoção de matéria orgânica e de nitrogênio amoniacal da ordem de 70% (Albuquerque e Polvinelli, 2011). Esta solução já foi adotada em várias cidades do mundo, inclusive em algumas cidades brasileiras como Belo Horizonte (MG), Porto Alegre (RS), Niterói (RJ) e São Paulo (SP). No entanto, a utilização dessa técnica pode acarretar em vários problemas pertinentes ao processo de tratamento do esgoto, tais como redução da sedimentabilidade de flocos, surgimento de espuma e problemas com corrosão. Ainda, o principal problema decorrente da co-disposição do lixiviado para tratamento com esgoto sanitário se deve a seu elevado teor de nitrogênio amoniacal, que pode chegar a inibir completamente a fase metanogênica do tratamento em reatores UASB, devido à sua alta toxicidade para as bactérias atuantes nessa etapa.

Neste contexto, uma alternativa é o pré-tratamento do lixiviado à montante da co-disposição, de forma a reduzir a concentração de nitrogênio amoniacal mediante aplicação de processos físico-químicos. Dentre os processos conhecidos, o arraste de amônia tem apresentado os menores custos de instalação e operação, bem como elevada eficiência de remoção do nitrogênio amoniacal (Souto, 2009). O arraste mecânico em tanques de arraste se dá por meio de dispositivos mecânicos denominados impelidores que, ao realizarem movimento rotativo, promovem o aumento da superfície de contato do lixiviado com o ar circundante, acelerando a perda do nitrogênio amoniacal para o ar.

OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a aplicação, realizar o pré-dimensionamento e a pré-avaliação econômica do processo de arraste mecânico de amônia tratando lixiviado de aterro sanitário. Foram avaliados diferentes cenários hipotéticos e configurações operacionais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o escalonamento do sistema de arraste de amônia, foi utilizado como ponto de partida os resultados obtidos em escala de laboratório por Rietow *et al.* (2017). Estes autores realizaram ensaios de arraste utilizando equipamento agitador *jar-test* com velocidade de rotação de 200 RPM, que equivale a um G (gradiente de velocidade) de aproximadamente 340 s^{-1} . Foi reportada uma maior eficiência de remoção de amônia (redução do tempo de detenção) com a elevação do pH (pH 9 e 10), mediante a adição de alcalinizante (hidróxido de sódio).

Escalonamento do sistema de arraste de amônia

Foram criados três cenários a fim de se analisar a escalabilidade do processo de arraste de amônia de lixiviado de aterro sanitário, para três cidades hipotéticas com níveis populacionais distintos, denominadas A, B e C, com 5.000, 50.000 e 500.000 hab., respectivamente. Para cada cidade, estimou-se uma taxa de crescimento populacional baseada na hipótese de crescimento linear, com uma razão de crescimento média entre cidades

paranaenses com portes similares, e assim projetou-se o crescimento populacional para os vinte anos seguintes. Em seguida, foi realizado o pré-dimensionamento dos aterros sanitários de cada cidade, e estimou-se a vazão de lixiviado para cada uma delas, por balanço hídrico simplificado e com as componentes de precipitação e escoamento superficial, e diretamente proporcional à área do aterro correspondente (Arsego e Nakamura, 2017).

Com os dados da vazão diária de lixiviado partiu-se para o dimensionamento dos tanques de arraste, que consistiu na escolha do impelidor, na definição do regime de agitação do fluido e na determinação da geometria do tanque mediante aplicação direta das equações propostas por McCabe (2001). Foi escolhida como concentração residual máxima admissível de nitrogênio amoniacal, para co-disposição, o valor de 200 mg/L, a partir de valores reportados por diversos autores como uma concentração não-prejudicial para o tratamento anaeróbio (Yuzer, Akgul e Mertoglu; 2012; Chernicharo, 2007)

Finalmente, foi realizada uma comparação de custos entre os 18 cenários resultantes da combinação entre diferentes materiais construtivos (concreto e geomembrana), diferentes valores de pH nos casos de correção do pH, e diferentes níveis populacionais.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Estimativa da Vazão de Lixiviado

A estimativa da vazão de lixiviado para as três cidades hipotéticas, com níveis populacionais distintos, é mostrada na Tabela 1 (Arsego e Nagashima, 2017). Foram considerados dados de precipitação de 1650 mm/ano, com base no mapa de precipitação anual da SUDERHSA, atual Instituto das Águas do Paraná. Altura do Aterro: 10 m.

Tabela 1 - Estimativa da vazão de lixiviado (Fonte: Arsego e Nagashima (2017))

Cidade	População (hab.)	Área Projetada do Aterro (m ²)	Vazão de Lixiviado (m ³ /ano)	Vazão de Lixiviado (m ³ /dia)
Cidade A	5.855	1.902	941,49	2,58
Cidade B	53.952	27.319	13.522,91	37,05
Cidade C	633.323	397.116	196.572,42	538,55

Ressalta-se que as vazões calculadas na Tabela 1 foram para final de projeto, ou seja, ao fim de todas as etapas de construção do aterro, representando, portanto, a máxima vazão de lixiviado que ocorrerá ao longo de sua vida útil e a população ao final deste período.

Dimensionamento dos Tanques de Arraste

A partir das vazões estimadas de lixiviado produzidos pelos aterros sanitários das três cidades hipotéticas, foram dimensionados os tanques para execução do processo de arraste, utilizando as relações do modelo de McCabe (2001). As dimensões obtidas para cada cenário são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Dimensões dos Tanques de Arraste. H: nível do fluido; J: largura do defletor; E: distância da lâmina do impelidor ao fundo do tanque; n: velocidade de rotação; Da: diâmetro do impelidor; Dt: diâmetro do tanque; L: comprimento da lâmina do impelidor; W: altura da lâmina do impelidor.

Cenário	Cidade A	Cidade B	Cidade C
H (m)	3,60	4,20	9,90
J (m)	Inexistente	Inexistente	Inexistente
E (m)	1,20	1,40	3,30
n (rps)	3	3	3
Da (m)	1,20	1,40	3,30
Dt (m)	3,60	4,20	9,90
L (cm)	30	35	82,5
W (cm)	24	28	66

Em seguida, foi avaliado o efeito da adição de alcalinizante ao tratamento, visando uma redução nos custos com materiais a partir da redução no tempo de detenção do lixiviado, o que consequentemente reduz a quantidade de tanques necessária. De modo a facilitar a visualização dessa implicação, foram fixadas as dimensões dos tanques, variando somente suas quantidades.

O tempo de detenção necessário para reduzir a concentração de nitrogênio amoniacal foi reduzido de 13 dias para 9 e 6 dias, com o pH reduzido de 9 e 10, respectivamente (Rietow *et al.*, 2017).

Custos de Implantação e Operação dos Tanques

Com base nos volumes de solução de alcalinizante (NaOH) utilizados para correção do pH verificados em escala de laboratório (Rietow *et al.*, 2017) e no valor de mercado deste reagente (ano base 2017), foram calculados os custos diários referentes à adição da solução de alcalinizante no processo de arraste (Tabela 3).

Tabela 3 – Tanques de Arraste: Cálculo dos custos inerentes à adição de alcalinizante. Cidade A: 5.000 hab.; Cidade B: 50.000 hab.; Cidade C: 500.000 hab.

Cenário	pH	Preço NaOH (R\$/kg)	kg NaOH/L de solução 32%	Volume de solução para correção do pH (L de solução / L de lixiviado)	Custo por volume (R\$/L de lixiviado)	Vazão (L de lixiviado/dia)	Custo diário (R\$/dia)
Cidade A	9	15,00	0,32	0,010	0,048	2580	123,84
	10	15,00	0,32	0,035	0,168	2580	433,44
Cidade B	9	15,00	0,32	0,010	0,048	37050	1778,40
	10	15,00	0,32	0,035	0,168	37050	6224,40
Cidade C	9	15,00	0,32	0,010	0,048	538550	25850,40
	10	15,00	0,32	0,035	0,168	538550	90476,40

Por fim, foram calculados para cada cenário, sistema e valor de pH os custos totais de construção dos tanques (movimentação de terra, impermeabilização e materiais construtivos), bem como os custos diários de operação com alcalinizante, (Tabela 4). A composição percentual dos custos é apresentada em sequência, na Tabela 5.

Tabela 4 – Tanques de Arraste: Resumo dos custos estimados para cada cenário

Cenário	Número de Tanques	Sistema	pH	Custo total de construção	Custo diário de operação (alcalinizante)
Cidade A	1	Concreto	Natural	R\$ 6.648,52	R\$ 0,00
			9	R\$ 6.648,54	R\$ 123,84
			10	R\$ 6.648,54	R\$ 433,44
		Geomembrana	Natural	R\$ 2.476,79	R\$ 0,00
			9	R\$ 2.476,79	R\$ 123,84
			10	R\$ 2.476,79	R\$ 433,44
Cidade B	9	Concreto	Natural	R\$ 56.359,13	R\$ 0,00
			9	R\$ 37.627,19	R\$ 1.778,40
			10	R\$ 25.084,79	R\$ 6.224,40
		Geomembrana	Natural	R\$ 30.258,63	R\$ 0,00
			9	R\$ 20.172,42	R\$ 1.778,40
			10	R\$ 13.727,00	R\$ 6.224,40
Cidade C	10	Concreto	Natural	R\$ 340.180,07	R\$ 0,00
			9	R\$ 238.126,05	R\$ 25.850,40
			10	R\$ 170.090,03	R\$ 90.476,40
		Geomembrana	Natural	R\$ 197.002,79	R\$ 0,00
			9	R\$ 137.901,95	R\$ 25.850,40
			10	R\$ 98.501,39	R\$ 90.476,40

Tabela 5 – Tanques de Arraste: composição dos custos totais

Cenário	Sistema	pH	% Concretagem	% Movimentação de terra	% Impermeabilização
Cidade A	Concreto	Natural	51	3	45
		9	51	3	45
		10	51	3	45
	Geomembrana	Natural	0	7	93
		9	0	7	93
		10	0	7	93
Cidade B	Concreto	Natural	72	5	22
		9	72	5	22
		10	72	5	22
	Geomembrana	Natural	0	8	92
		9	0	8	92
		10	0	10	90
Cidade C	Concreto	Natural	67	11	21
		9	67	11	21
		10	67	11	21
	Geomembrana	Natural	0	17	83
		9	0	17	83
		10	0	17	83

Os resultados expostos mostraram uma forte influência da concretagem sobre o custo total do sistema com concreto, chegando a 72% para a Cidade B, mas sendo superior a 50% em todos os cenários. Também foi observado o forte efeito da impermeabilização sobre o custo total do sistema com geomembrana (superior a 80% em todos os cenários).

Comparando-se os dois sistemas entre si, em todos os cenários analisados o sistema com geomembrana se sobressaiu economicamente por apresentar custos bastante inferiores em relação ao sistema com concreto, tanto para pH natural quanto para o pH elevado com alcalinizante. O impacto nos custos de construção provocou uma diferença superior a 40%, chegando a 63% para a Cidade A.

Com relação ao uso de alcalinizante, foi obtida uma redução no custo total de construção, devido à redução no número de tanques. No entanto, os gastos diários com alcalinizante tornam esta alternativa demasiadamente onerosa especialmente nas Cidades de maior porte, pois a economia gerada na implantação (construção) é rapidamente superada (em poucos meses) pelo custo diário de operação.

CONCLUSÕES

- O pré-dimensionamento do processo de arraste apresentou maior potencial com a utilização de geomembrana, em que o maior custo encontrado foi de R\$ 197.002,79 para o caso da Cidade C sem correção de pH, em comparação com o concreto, cujo custo correspondente foi de R\$ 340.180,07;
- Para o caso das cidades com maior nível populacional, seria mais conveniente a construção na forma de lagoas para o arraste ao invés de tanques de concreto;
- A utilização do processo de arraste de amônia sem uso de alcalinizante parece ser mais atrativa em qualquer cenário avaliado, dado que os custos operacionais decorrentes da aplicação de alcalinizante superam em poucos meses os custos de construção dos tanques em si.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AISSE, M. M. Estruturação Sanitária das Cidades: disciplina obrigatória da graduação em Engenharia Civil, mar.-jun. de 2015. **Notas de aula**. Não publicado.
2. ALBUQUERQUE, E. M. de; POVINELLI, J. **Caracterização da eficiência dos processos de tratamento de lixiviado de aterro sanitário no Brasil**. Anais. Porto Alegre: [s.n.], 2011.
3. ARSEGO, M. M.; NAGASHIMA, M. Y. Y.. **Aplicação e pré-dimensionamento do processo de arraste mecânico de amônia como pré-tratamento de lixiviados de aterros sanitários**. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil. UFPR. 2017
4. CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.
5. CORNELLI, R. *et al.* Métodos de tratamento de esgotos domésticos: uma revisão sistemática. **Revista de estudos ambientais**, v. 16, n. 2, p. 20-36, 2014.
6. McCABE, W. L. **Unit operations of chemical engineering**. 5. ed. p. 244 – 287. 2001.
7. METCALF & EDDY. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.
8. RIETOW, J. C.; NAGASHIMA, M. Y. Y.; DEUS, P. L.; BAETTKER, E. C.; AISSE, M. M.. Avaliação do processo de stripping da amônia como pré-tratamento de lixiviados de aterros sanitários. **Anais do 29º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. ABES, Rio de Janeiro, 2017.
9. RODRIGUES, F. S. F. **Aplicação da ozonização e do reativo de Fenton como pré-tratamento de chorume com os objetivos de redução da toxicidade e do impacto no processo biológico**. Dissertação de mestrado COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, XI, 79p., 2004.
10. SILVA, F. B. **Tratamento combinado de lixiviados de aterros sanitários**. 2009. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2009.
11. SOUTO, G. A. B. **Lixiviado de aterros sanitários brasileiros – estudo da remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar (“stripping”)**. 371 p. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, 2009.
12. YUZER, B.; AKGUL, D.; MERTOGLU, B. **Effect of high ammonia concentration on UASB reactor treating sanitary landfill leachate**. *Fen Bilimleri Dergisi*, v. 24, n. 2, p. 59 – 67, 2012.