

III-077 - ESTUDO COMPARATIVO DA COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO E ELETROCOAGULAÇÃO NO TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO

Diego da Silva Ferreira

Doutorando e Mestre em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos pela Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Biólogo pela Universidade Castelo Branco (RJ)

Juacyara Carbonelli Campos⁽¹⁾

D.Sc. em Engenharia Química — Tecnologia Ambiental - PEQ/COPPE/UFRJ. Engenharia Química/UFRJ. Professora Associada do Departamento de Processos Inorgânicos da Escola de Química /UFRJ

Endereço⁽¹⁾: Av. Athos da Silveira Ramos, 149 Bloco E sala 206, Ilha do Fundão. Rio de Janeiro. CEP 21941-909. juacyara@eq.ufrj.br

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da coagulação/floculação com sulfato de alumínio, cloreto férrico, Tanfloc SH e Panfloc e a eletrocoagulação, com chapas de alumínio, no tratamento de lixiviado de aterro sanitário. Foram avaliados o pH (4-8) e concentração de coagulante (400 – 1000 mg/L) na remoção de DQO, Turbidez e Absorbância (254nm). Para a eletrocoagulação, as mesmas condições foram avaliadas, considerando a concentração de alumínio gerado *in situ*. O coagulante cloreto férrico foi o que apresentou a melhor eficiência para a concentração de 500mg/L e com o pH igual a 5,0; obtendo os seguintes resultados de eficiência de remoção: 59,9% de DQO; 7,7% de turbidez e 72,9% de absorbância a 254 nm, respectivamente. A eletrocoagulação apresentou como melhor resultado a concentração de 1000mg/L com o pH 5,0; obtendo os valores de 53,9% de remoção de DQO; 94,5% de remoção de turbidez e 71,4% de remoção de absorbância a 254 nm.

PALAVRAS-CHAVE: Coagulação/floculação, eletrocoagulação, lixiviado de aterro e remoção de matéria orgânica

INTRODUÇÃO

A composição química e microbiológica do lixiviado é bastante complexa e variável, uma vez que, além de depender das características dos resíduos depositados, outros fatores são importantes, como: As condições ambientais, a forma de operação do aterro e, principalmente, pela dinâmica dos processos de decomposição que ocorrem no interior das células (FELICI, 2010).

O tratamento para os lixiviados de aterros tem recebido significativa atenção nos últimos anos, em especial nos centros urbanos, onde a população cresce muito e a fiscalização é mais operante. O lixiviado pode apresentar alta concentração de DQO (Demanda Química de Oxigênio) e nitrogênio amoniacal (UYGUR E KARGV, 2004), entre outras coisas, tornando o tratamento de lixiviado um desafio.

O processo de coagulação/floculação é uma técnica relativamente simples, que pode ser utilizada com sucesso no tratamento de lixiviado (AMOKRANE, et al. 1997). O tipo de coagulante utilizado, a concentração e o pH do efluente são fatores importantes para que o processo aconteça e seja eficiente. É importante ressaltar que está técnica talvez não seja capaz de reduzir em total o teor orgânico, porém, o percentual que reduzir, será fundamental na escolha da próxima etapa de tratamento.

O processo de eletrocoagulação é uma tecnologia complexa. Estes reatores consistem de arranjos de eletrodos em contato direto com o efluente e com a geração *in situ* de coagulante, que é o principal diferencial. Para liberar o coagulante, é requerida a aplicação de uma diferença de potencial através dos eletrodos. Os eletrodos poder ser produzidos de diversos tipos de materiais, sendo o ferro e o alumínio os mais utilizados. O ferro e o alumínio são dissolvidos do anodo gerando íons correspondentes do metal, que é hidrolisado quase imediatamente ao hidróxido polimérico de ferro ou de alumínio. Estes hidróxidos poliméricos são agentes

coagulantes excelentes. Os anodos consumíveis (sacrifício) do metal são usados para produzir continuamente hidróxidos poliméricos na vizinhança do anodo. A coagulação ocorre quando estes cátions do metal se combinam com as partículas negativas carregadas para o anodo pelo movimento eletroforético (MOLLAH, 2004).

O presente trabalho teve como objetivo identificar as melhores condições de tratabilidade para lixiviados, utilizando as técnicas de coagulação/floculação e eletrocoagulação remoção de matéria orgânica.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado o lixiviado bruto proveniente do Centro de Tratamento de Resíduos de Gericinó, localizado em Bangu, Rio de Janeiro. As amostras foram coletadas e armazenadas no laboratório de Tratamento de Águas e Reúso de Efluente – Labtare (EQ/UFRJ), em bombonas de 20 litros, armazenadas a 4°C até sua utilização.

O lixiviado bruto foi caracterizado pelos seguintes parâmetros (APHA, 2005): Nitrogênio Amoniacal, Carbono Orgânico Total (COT), Cloreto, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅), Demanda Química de Oxigênio (DQO), pH, Turbidez e Absorvância em 254nm, essa última fornece uma indicação do conteúdo de matéria orgânica aromática (APHA, 2005). A toxicidade aguda foi avaliada através de ensaio em Microtox.

ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO

Os ensaios de coagulação/floculação foram realizados no “Jar-test” (Modelo Nova Ética) com capacidade a realização simultânea de até seis ensaios com um volume de 2000mL em cada frasco. Foram utilizados ácido sulfúrico (H₂SO₄) para acidificar e o hidróxido de sódio (NaOH) para alcalinizar o lixiviado, já que foram realizados teste com variação de pH.

A etapa de mistura rápida deu-se por 60 segundos a uma velocidade rotacional de 150 rpm. Esta etapa foi seguida da mistura lenta, que teve duração de 30 minutos à velocidade de 30 rpm. A sedimentação foi realizada por 30 minutos.

A Tabela 1 ilustra as condições avaliadas no presente trabalho para cada coagulante.

Tabela 1: Descrição dos coagulantes e as respectivas variáveis testadas.

Coagulante	Concentração	pH	Variável de resposta
Cloreto Férrico	400 – 1000 mg/L	4 – 8	Turbidez DQO Abs 254
Sulfato de Alumínio			
Tanfloc SH			
Panfloc AB346			

Ressalta-se que as concentrações são referentes respectivamente às concentrações de Fe⁺³, Al⁺³ e Al₂O₃, no caso dos produtos cloreto férrico, sulfatoalumínio e policloreto de alumínio, respectivamente. Para o coagulante que gerou melhores resultados foi realizado o ensaio em maior volume para avaliação de COT e DBO.

ELETROCOAGULAÇÃO

Foram utilizados 1,5 L de lixiviado em bécher com capacidade de 2L. Foram utilizados 8 eletrodos de alumínio. A Figura 1 apresenta uma foto do aparato experimental utilizado nos ensaios da eletrocoagulação. Nesse modelo experimental, os eletrodos não foram imersos completamente no lixiviado, apenas a área de 50 cm² por eletrodo. O modelo utilizado do sistema foi o com eletrodos monopolares em série.



Figura 1- Foto do aparato experimental

A Figura 2 apresenta o arranjo de eletrodos utilizado no presente trabalho. É possível identificar os parafusos de fixação dos eletrodos e o parafuso específico do anodo ou catodo.



Figura 2- Foto do arranjo de eletrodos de alumínio.

O pH foi ajustado para o valor desejado (foi variado de 4 a 8). Foi utilizado a equação de Faraday (eq.1) para expressar a quantidade de alumínio liberado in situ.

$$m = \frac{i \times t \times M}{F \times n} \quad (1)$$

Sendo

m = Quantidade máxima do eletrodo consumida, g.

i = Corrente aplicada, A.

t = Tempo de aplicação da corrente, s.

M = Massa molar do elemento predominante no eletrodo, g/mol.

n = Número de elétrons envolvidos na reação de oxidação do elemento do anodo.
 F = Constante de Faraday, 96.500 C/mol.

O tempo utilizado durante o processo foi proporcional a concentração de alumínio desejada a liberar *in situ*. Embora esta quantidade calculada seja um valor teórico, geralmente há boa concordância com o valor determinado experimentalmente (MOLLAH et al., 2004). A Tabela 2 representa o tempo de operação e amperagem utilizada para liberar *in situ* a concentração desejada.

Tabela 2: Valores das variáveis utilizadas durante a eletrocoagulação

pH	Corrente (Ampères)	Tempo (minutos)	Concentração mg Al^{+3} /L
4 - 8	3,57	45	600
	4,76		800
	4,69		1000
	7,15		1200

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização do lixiviado utilizado neste trabalho pode ser observada na Tabela 3

Tabela 3 - Caracterização do lixiviado do aterro controlado de Gericinó (n= 6)

Parâmetros	Faixa	Valor médio	Desvio padrão
Absorvância em 254 nm	16,8 – 19,1	17,8	0,8
COT (mgC/L)	617,1 – 752,3	685,1	61,2
Cloreto (mgCl/L)	2833 - 3021	2917	211
DBO5 (mgO ₂ /L)	48,3 – 146,8	85,94	56,54
DQO (mgO ₂ /L)	1901 - 2022	1973	55,16
Dureza (CaCO ₃ /L)	433,3– 561,3	467	66
pH	7,81 – 8,0	7,94	0,14
Turbidez (NTU)	15,8 – 21,1	21,7	4,56
DBO ₅ /DQO		0,04	
DQO/COT		2,88	

Segundo Castilho Jr et al. (2006), as concentrações de DBO e DQO tendem a sofrerem reduções ao longo da degradação dos resíduos aterrados. Entretanto, a DBO decresce mais rapidamente em relação à DQO, que permanece no lixiviado devido à matéria orgânica de difícil degradação. A relação DBO/DQO sugere o estágio de degradação do resíduo aterrado. Para o lixiviado avaliado, o mesmo apresenta em avançado estágio de degradação apresentando a relação DBO/DQO igual a 0,04. De fato, o aterro tem mais de 30 anos de operação.

Ensaio de Coagulação/Floculação

A Figura 3 apresenta os resultados de DQO após os ensaios com sulfato de alumínio. É possível identificar que o coagulante se comporta de forma diferente em virtude do pH do lixiviado. O valor da DQO sem o tratamento é de 1981mg/L e o valor de pH igual a 7,91. Após os ensaios, as melhores condições de tratamento foram: concentração de coagulante de 600mgAl⁺³/L e pH na faixa de 5,0 à 6,0.

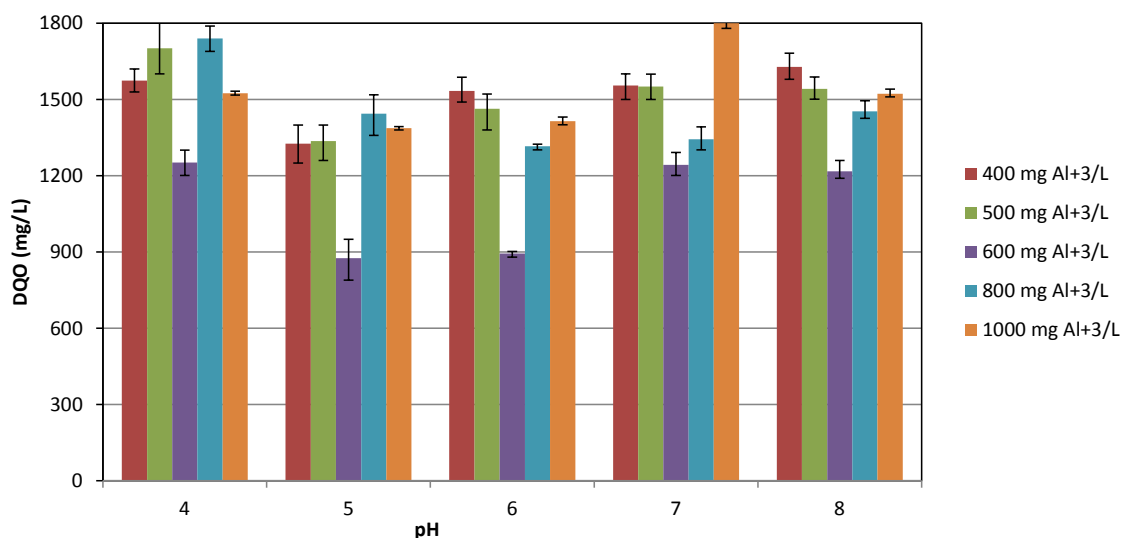


Figura 3. Resultados de DQO dos ensaios de coagulação/floculação utilizando Sulfato de alumínio. Condições de ensaio: Agitação rápida: 1 min, 150 RPM, Agitação lenta: 30 min, 30 RPM e tempo de sedimentação: 30 min. DQO do lixiviado bruto: 1981mg/L.

Para o parâmetro turbidez, a concentração de sulfato de alumínio na faixa 600mg/L e 800mg/L e pH de 7 a 8 foram as condições que apresentaram os melhores resultados.

A Figura 4 ilustra o comportamento da absorbância em virtude da concentração do coagulante e o pH. É possível observar que os melhores resultados foram na faixa de 400mg Al^{+3} /L e 500mg Al^{+3} /L e o pH igual a 5,0. A remoção foi de 70-77% respectivamente, com o pH igual a 5,0. No resultado foi evidenciado que o pH não foi fator influente na remoção da absorbância e sim a concentração do coagulante. Isso mostra que houve a remoção das substâncias húmicas e fúlvicas, uma vez que esse parâmetro é referente a presença de compostos com dupla ligações conjugadas (APHA, 2005).

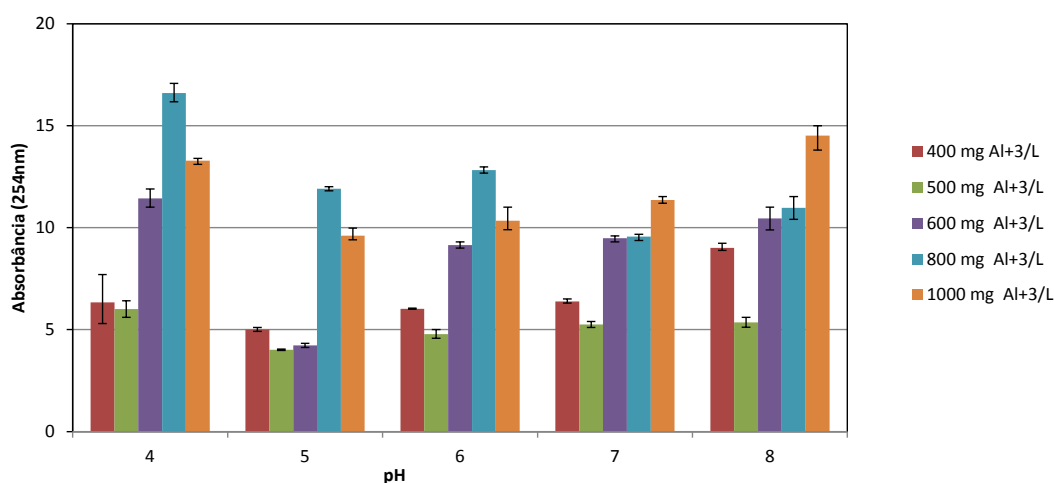


Figura 4. Resultados da Absorbância nos ensaios de coagulação/floculação utilizando Sulfato de alumínio. Condições de ensaio: Agitação rápida: 1 min, 150 RPM, Agitação lenta: 30 min, 30 RPM e tempo de sedimentação: 30 min. Valor da Absorbância em 254nm do lixiviado bruto foi de 18,2nm.

Para o coagulante cloreto férrico, os resultados de DQO são apresentados na Figura 5. Observa-se que independente da concentração do coagulante, o melhor pH foi igual a 5,0. As concentrações de $500\text{mgFe}^{+3}/\text{L}$ a $600\text{mgFe}^{+3}/\text{L}$ foram as que apresentam as melhores remoções com o percentual de 59,8- 62,4% respectivamente.

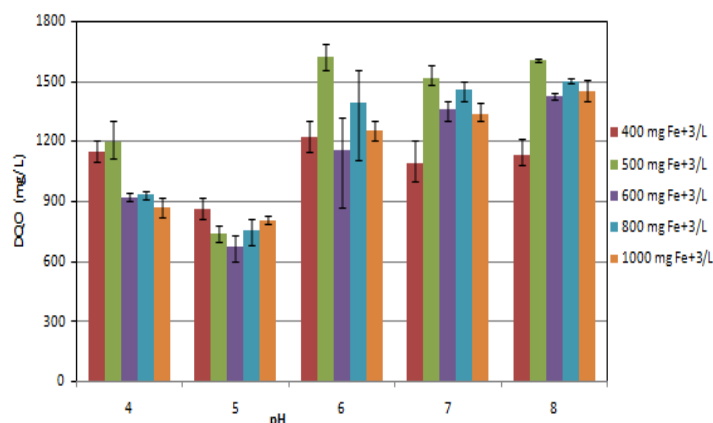


Figura 5. Resultados de DQO dos ensaios de coagulação/floculação utilizando Cloreto férrico. Condições de ensaio: Agitação rápida: 1 min, 150 RPM, Agitação lenta: 30 min, 30 RPM e tempo de sedimentação: 30 min. DQO do lixiviado bruto: 1981mg/L.

Segundo Wei Li *et al.* (2010), os experimentos realizados com lixiviado na cidade de Tianjin (China), a eficiência de remoção com melhores resultados foi em condições básicas. Os autores obtiveram reduções de turbidez e DQO de, 93% e 65%, respectivamente, para a 0,3 e 0,8 gFe³⁺/L. A razão para este comportamento pode ser explicado pelas diferentes espécies hidrolisadas de ferro, segundo os autores, que apresentam melhor afinidade com as substâncias húmicas e fúlvicas(WEI LI *et al.*2010)

Para a turbidez, os melhores resultados obtidos foi nas condições de $500\text{mgFe}^{+3}/\text{L}$ com o pH igual a 5,0, onde a turbidez final chegou a 5,73 NTU

O valor inicial da absorbância foi de 17,2 e após os ensaios observou-se uma redução nos valores, principalmente em pH ácido. A Figura 6 ilustra esses ensaios e é possível identificar que o aumento da concentração não é um fator favorável, pois não apresentou melhoria na remoção. Os melhores resultado foram para as concentrações de 400 a $600\text{mgFe}^{+3}/\text{L}$ e pH igual a 5,0. O percentual de remoção variou de 67,9 a 72,9%. O pH igual a 6,0 só apresentou resultado satisfatório para a concentração de $400\text{mgFe}^{+3}/\text{L}$.

Ntampou et al. (2005) utilizaram o cloreto férrico para tratar o lixiviado da Salónica, Grécia. Os autores obtiveram os resultados de remoção de cor, absorbância em 254nm e DQO de 98%, 82% e 72%, respectivamente para as dosagem de 7 molFe/L (391mgFe/L).

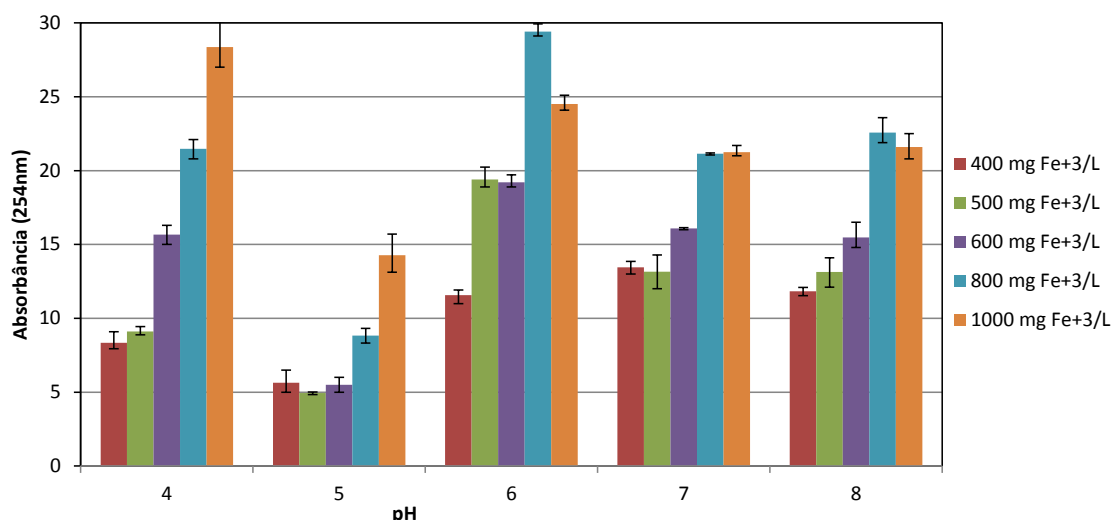


Figura 6- Resultados da Absorbância nos ensaios de coagulação/floculação utilizando o cloreto férrico. Condições de ensaio: Agitação rápida: 1 min, 150 RPM, Agitação lenta: 30 min, 30 RPM e tempo de sedimentação: 30 min. Absorbância em 254nm do lixiviado bruto: 18,2 nm.

Os resultados utilizando os produtos Tanfloc e Panfloc ficaram aquém dos obtidos com os coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico. A Tabela 4 apresenta um resumo dos melhores resultados para cada coagulante, variando o pH e a concentração do coagulante utilizado em cada ensaio. Para construção dessa tabela, foi utilizado como ordem de importância, a DQO, a absorbância em 254nm e a turbidez.

Tabela 4: Resumo dos resultados de coagulação/floculação para os coagulantes: Cloreto férrico, Sulfato de alumínio, Tanfloc SH e Panfloc. Condições de ensaio: Agitação rápida: 1 min, 150 RPM, Agitação lenta: 30 min, 30 RPM e tempo de sedimentação: 30 min.

Parâmetro	Coagulante	Valor ou Faixa de Concentração ótima (mg/L)	Valor ou Faixa de pH ótimo	Valor ou Faixa de Eficiência de Remoção (%)	Valor ou Faixa no efluente tratado
DQO (mg/L)	Cloreto Férrico	500-600	5	59,8- 62,4	670-736
	Sulfato de Alumínio	600	5-6	55,2-54,5	876-894
	PAC	500-600	4-5	45,1-50,8	1101-1110
	Tanfloc	1000	7-8	31,8-28,6	1339-1409
Abs 254nm	Cloreto Férrico	400-600	5	68,4-67,9	5-5,6
	Sulfato de Alumínio	400-500	5	74,7-77	4-4,2
	PAC	400-500	5	55,3-77,1	4,4
	Tanfloc	500	5	76	4,1
Turbidez (NTU)	Cloreto Férrico	500	5	68,5	5,9
	Sulfato de Alumínio	600-800	7-8	63,3-69,7	5,3-6,7
	PAC	600-800	7	82,5-85,1	2,9-3,3
	Tanfloc	800	5	84,9	2,8

Segundo Marañón et al. (2008), o tratamento de lixiviado com aterro novo com coagulantes levou a elevadas remoções de turbidez (até 98%) e de cor (até 91%), mas a remoção de DQO obtida pelos autores foi baixa (até 26%). Segundo os autores, o pH de trabalho ótimo é cerca de 3,8 para o cloreto férrico e em torno de 6,0 para o sulfato de alumínio.

Ensaio de Eletrocoagulação

A Figura 7 apresenta os resultados de remoção de DQO utilizando a eletrocoagulação, onde os melhores resultados foram obtidos para valores de pH igual a 4,0 e 5,0 na concentração de 1000mgAl³⁺/L. O percentual de remoção da DQO e os valores de remoção foram de 54,9%, e 53,4% para o pH igual a 4,0 e 5,0. Para alcançar este resultado foi necessário utilizar uma densidade de corrente de 116,7 A/m². Li et al. (2011) obtiveram 20,8% de remoção de DQO nas condições de 2,98mA/cm² densidade da corrente, 50 minutos tempo de eletrólise e pH igual a 6,5 tratando o lixiviado de Yanqun, China.

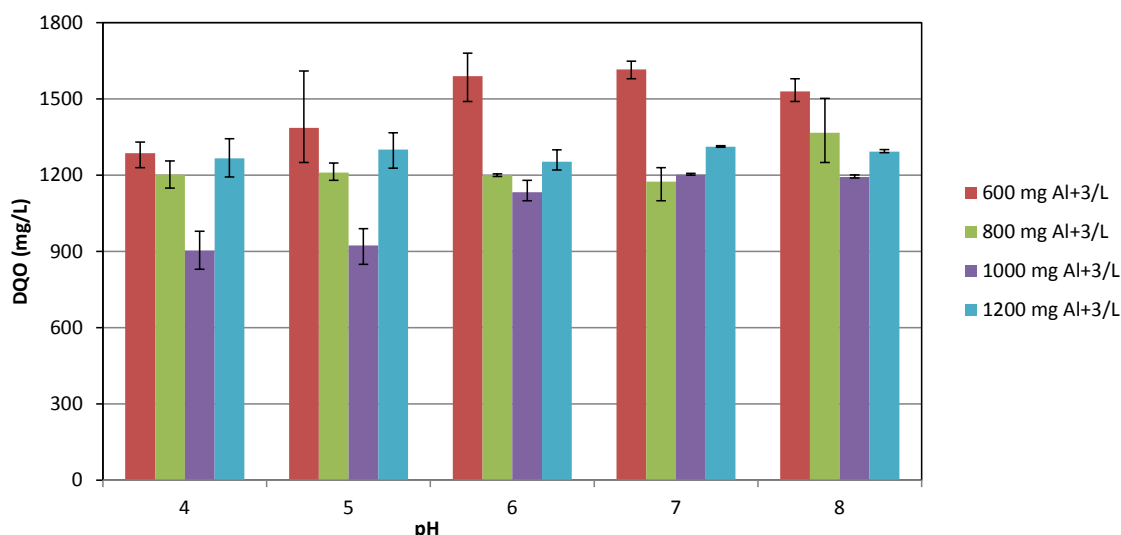


Figura 7: Resultados da DQO dos ensaios de eletrocoagulação. Condições de ensaio: Condições de ensaio: Concentração de alumínio liberado in situ; Placa de alumínio com uma área de 100cm² e a espessura de 10 mm. O eletrodo com um arranjo de 8 placas. DQO do lixiviado bruto: 1994mg/L.

Para remoção de turbidez, a única concentração que foi eficiente foi de 1000 mg Al³⁺/L, independente do pH utilizado.

RESUMO DOS RESULTADOS

A Tabela 5 apresenta os ensaios selecionados de coagulação/floculação e eletrocoagulação que apresentaram as melhores remoções. Na coagulação/floculação o cloreto férrico na concentração 500mgFe³⁺/L com o pH igual a 5,0 e a eletrocoagulação foi a concentração de 1000mgAl³⁺ com o pH igual a 5,0.

Tabela 11: Os melhores resultados para a coagulação e eletrocoagulação.

Parâmetros	Lixiviado Bruto	Coagulação Coagulante: Cloreto férrico		Eletrocoagulação Chapa de Alumínio	
		Resultado Final	Remoção (%)	Resultado final	Remoção (%)
DBO ₅ (mgO ₂ /L)	146,8	62,1	57,6	109,3	25,5
DBO/DQO		0,07		0,12	
Absorbância (254nm)	19,1	5,09	73,3	5,67	70,3
DQO (mg/L)	2032	802	60,5	1001	50,7
Turbidez (NTU)	21,1	6,81	67,7	1,09	94,8
COT (mgC/L)	752,3	308	59	406	46,0
Toxicidade Aguda Microtox– CE 50 (em %)	31,25	64,16		58,06	

CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

Na avaliação dos coagulantes e o comportamento em pH diferentes. Nenhum coagulante apresentou um desempenho de remoção eficiente para as variáveis de DQO, Absorbância e Turbidez com o mesmo pH. O cloreto férrico foi o coagulante que melhor se comportou para uma única faixa de pH e diferentes concentrações.

Na média, o cloreto férrico obteve os melhores resultados.

A eletrocoagulação apresentou uma eficiência associada ao aumento da concentração de alumínio liberado *in situ*. Ficou evidente, que aumentando a corrente, maior poderá ser a eficiência do processo, o que também irá gerar um aumento no custo. As melhores remoções foram na faixa de pH igual a 5 e 6 a concentração de 1000mgAl⁺³/L. A alta flotação pode ser considerada um fator negativo para o processo e o uso de um polieletrólito pode ser um auxiliar importante para reduzir a flotação.

Na comparação dos ensaios de coagulação/floculação e a eletrocoagulação, o ensaio da coagulação apresentou um melhor desempenho utilizando o cloreto férrico na concentração de 500mgFe⁺³/L para o pH igual a 5,0 e também foi melhor na remoção de DQO, Absorbância, DBO e COT. A eletrocoagulação apresentou o melhor desempenho para a remoção da turbidez com a concentração de 1000mgAl⁺³/L com o pH igual a 5,0.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. A. AMOKRANE, C. COMEL, J. VERON, Landfill leachate pretreatment by coagulation– flocculation, Water Res. 31 (1997) 2775–2782.
2. APHA, AWWA, WPCF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st Ed., 2005.
3. CASTILHOS JR., A. B. (coord.), GOMES, L. P., LANGE, L. C., JUCÁ, J. F. T., FERNANDES E SILVA, S. M. C. P., 2006, Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários, ABES/PROSAB, Rio de Janeiro.
4. FELICI, E.M. (2010) Coagulação-floculação-sedimentação como pós-tratamento de efluente de sistema biológico em batelada aplicado a lixiviado de aterro de resíduos sólidos urbanos. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina. Londrina. 139.



5. Li, Xiangdong, Junke Song, JiandongGuo, Zhichao Wang, QiyanFeng : Landfill leachate treatment using electrocoagulation , 2011.
6. MOLLAH, M.; MORKOVSKY, P. ; OTHERS. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. journal of Hazardous Materials, 114:119{210, 2004.
7. UYGUR, A.; KARGV, F. Biological nutrient removal from pre-treated landfill leachate in a sequencing batch reactor. Journalof Environmental Management. V. 71, p. 9–14, 2004.
8. Wei Li, Tao Hua, Qixing Zhou, Shuguang Zhang, Fengxiang Li - Treatment of stabilized landfill leachate by the combined process of coagulation/flocculation and powder activated carbon adsorption (2010).