



II-448 – PÓS-TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO POR FLOTAÇÃO DE EFLUENTE ANAERÓBIO DE UM SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE ABATEDOURO DE FRANGO

Ivana Ribeiro de Nardi⁽¹⁾

Graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal do Paraná. Doutora em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Professora no Centro Universitário Central Paulista, São Carlos, SP.

Valéria Del Nery

Graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos. Doutora em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Consultora na área de tratamento de águas residuárias.

Natalia Gonçalves dos Santos

Graduanda em Química pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Araraquara, SP.

Franciane Chimenes

Técnica em Química pelo Centro Educacional Diocesano La Salle, São Carlos, SP.

Elizabeth de Mattos Moraes

Graduação em Farmácia pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Araraquara, SP. Mestre em Ecologia pelo Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo. Pesquisadora na Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Endereço⁽¹⁾: Rua Miguel Petroni, 5111 – São Carlos - SP - CEP: 13.563-470 - Brasil - Tel: (16) 3362-2111 - e-mail: ivananardi@yahoo.com.br

RESUMO

O objetivo desse trabalho de pesquisa foi avaliar o uso do sistema de flotação por ar dissolvido como alternativa de pós-tratamento de água residuária de abatedouro de frango tratada anaerobiamente. Cloreto férrico comercial e polímero catiônico foram usados como coagulante e auxiliar de flotação, respectivamente. Os melhores parâmetros operacionais estabelecidos foram: pH de coagulação de 5,0-5,5, relação molar Fe/P de 2,0-2,7, dosagem de polímero catiônico de 1,0 mg/L, razão de recirculação de 10-30% e taxas de escoamento superficial de 3-12 m³/m².h. O uso de polímero catiônico foi obrigatório para aplicação de elevadas taxas de escoamento superficial. Os reatores anaeróbios associados ao sistema de flotação por ar dissolvido com tratamento químico produziram efluente de elevada qualidade, com 107 mg/L de DQO_T, <0,1 mgP/L de fósforo total, 18 mg/L de SST, 1,7 uT de turbidez e 33 UFC/100mL de *E. coli*, atendendo aos padrões de lançamento de fósforo e de sólidos suspensos. A eficiência na remoção de matéria orgânica depende da remoção da fração solúvel da DQO nos reatores anaeróbios.

PALAVRAS-CHAVE: Abatedouro de Frango, Flotação por Ar Dissolvido, Reatores UASB.

INTRODUÇÃO

A indústria brasileira de abate de frango foi consolidada em 2003 quando o Brasil se tornou líder mundial em vendas de carne de frango. Em 2007, a produção brasileira de carne de frango alcançou 9,7 milhões de toneladas e sua exportação totalizou 3,2 milhões de toneladas, mantendo o Brasil como primeiro exportador mundial. Estima-se que em 2007 foram geradas aproximadamente 97 milhões de metros cúbicos de águas residuárias provenientes dessa atividade.

Águas residuárias de abatedouros de frangos são caracterizadas por elevadas concentrações de matéria orgânica, nitrogênio orgânico e fosfatos orgânicos e inorgânicos.

As diretrizes internacionais sobre gerenciamento de água recomendam a utilização de processos anaeróbios como tecnologia principal para o tratamento de águas residuárias de indústrias alimentícias. Entretanto, na maioria dos casos, efluentes de sistemas anaeróbios não atendem aos padrões da legislação brasileira quanto ao reúso, reciclagem e descarga em corpos receptores. Dessa forma, o pós-tratamento é necessário para completar a remoção de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo.



Esse trabalho teve como objetivo avaliar a aplicação de um sistema de tratamento físico-químico por flotação, em escala de laboratório, como alternativa de pós-tratamento de efluente anaeróbico de indústria de abate de frango.

MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema de tratamento de águas residuárias do abatedouro de frango Céu Azul Alimentos Ltda, localizado na cidade de Sorocaba, SP, é composto por peneiras rotativas e estática, sistema de flotação por ar dissolvido (FAD) e dois reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB). Os reatores UASB apresentaram desempenho satisfatório, com eficiência de remoção de matéria orgânica solúvel, como DQO, em torno de 85%, e convertendo 79% do nitrogênio orgânico em amoniacal.

O estudo da aplicação de tratamento físico-químico por flotação como alternativa de pós-tratamento do efluente anaeróbico foi realizado em escala de laboratório. Foram realizados três ensaios: - tratamento por FAD, sem utilização de produtos químicos, como controle; - tratamento por FAD utilizando polímero catiônico como coagulante e; - tratamento por FAD utilizando cloreto férrico comercial como coagulante e polímero catiônico como auxiliar de flotação.

Nos ensaios de FAD – controle foram variadas a razão de recirculação (R) de 10 a 50% e a velocidade de flotação (V_{flot}) de 5 a 25 cm/min, equivalentes às taxas de escoamento superficial entre 3 e 15 m³/m².h.

Nos ensaios de FAD utilizando polímero catiônico como coagulante foram consideradas as variáveis: pH de coagulação (pH_{coag}) de 2,5 a 7,0, dosagem de polímero catiônico (DPC) de 0 a 20 mg/L, R de 10 a 50% e V_{flot} de 5 a 25 cm/min.

Nos ensaios de FAD utilizando cloreto férrico como coagulante e polímero catiônico como auxiliar de flotação foram variadas: pH_{coag} de 4,2 a 6,5, dosagem de cloreto férrico comercial de 0 a 230 mgFe³⁺/L, relação molar ferro/fósforo (Fe/P) de 0,45 a 4,14, DPC de 1 a 2 mg/L, R de 10 a 50% e V_{flot} de 5 a 25 cm/min.

A mistura rápida da solução de coagulante no líquido foi realizada em equipamento de reatores estáticos microcontrolado marca Milan modelo JT 103, constituído de 6 jarros quadrados, com volume total de 2 L (cada jarro). Os parâmetros gradiente médio de velocidade de mistura rápida (G_{mr}) e tempo de mistura rápida (t_{mr}) foram mantidos constantes em 110 s⁻¹ e 137 s, respectivamente.

A floculação e a flotação foram realizadas em equipamento para ensaios de flotação. O flotatestes era composto por três colunas de floculação/flotação, com volume útil de 2 L, independentes entre si e interligadas a uma câmara de saturação. A floculação foi realizada com gradiente médio de velocidade de floculação (G_f) de 60 s⁻¹ e tempo de floculação (t_f) de 20 min. Nos ensaios com adição de auxiliares de flotação, estes eram adicionados na coluna, após o início da floculação. Paralela à etapa de floculação, a água proveniente do sistema de abastecimento público era pressurizada a 450 kPa por aproximadamente 15 min na câmara de saturação. Após a etapa de floculação e de saturação da água com ar, o agitador era retirado da coluna e o registro de agulha alocado na entrada da coluna era aberto para entrada da água pressurizada proveniente da câmara de saturação para promover a flotação dos flocos da amostra. O volume de água pressurizada era função da razão de recirculação utilizada no ensaio.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ensaios de FAD - controle

Inicialmente, a flotação por ar dissolvido, sem utilização de produtos químicos, foi utilizada como controle. O sistema de flotação foi eficiente na remoção de sólidos suspensos, com eficiências de remoção de 58±12% de DQO_T, 75±9% de SST e 70±9% de turbidez. A remoção de fósforo total (PT), 49±13%, foi atribuída a fração de fósforo incorporada aos sólidos. A fração solúvel da DQO e o nitrogênio amoniacal não foram removidos (Tabela 1).



Tabela 1: Características do efluente do sistema de FAD.

Parâmetro	Sem adição de químicos ^a		Polímero catiônico ^b		Cloreto férrico e polímero catiônico ^c	
	N	Média	N	Média	N	Média
DQO _T (mg/L)	16	154±43	5	153±33	2	107
O&G (mg/L)	-	nd	-	nd	2	36
AT (mgCaCO ₃ /L)	-	nd	-	nd	2	87
NTK (mgN/L)	-	nd	-	nd	2	124
N-NH ₄ ⁺ (mgN/L)	16	161±1	4	181±11	2	110
PT (mgP/L)	16	9,4±3,7	5	12,2±0,6	2	<0,1
ST (mg/L)	-	nd	-	nd	2	673
STV (mg/L)	-	nd	-	nd	2	242
STF (mg/L)	-	nd	-	nd	2	431
SST (mg/L)	16	48±9	5	28±6	2	18
SSV (mg/L)	-	nd	-	nd	2	11
SSF (mg/L)	-	nd	-	nd	2	7
SDT (mg/L)	-	nd	-	nd	2	655
SDV (mg/L)	-	nd	-	nd	2	232
SDF (mg/L)	-	nd	-	nd	2	424
Turbidez (uT)	10	21,6±4,5	5	10,7±2,4	2	1,7
<i>E. coli</i> (UFC/100mL)	-	nd	-	nd	2	33

^aEnsaios realizados com R de 30% e V_{flot} de 10cm/min.

^bEnsaios realizados com DPC de 10mg/L, R de 30% e V_{flot} de 10cm/min.

^cEnsaios realizados com pH_{coag} de 5,3-5,6, relação molar Fe/P de 2,58-2,74, DPC de 1,0 mg/L, R de 30% e V_{flot} de 10 cm/min.

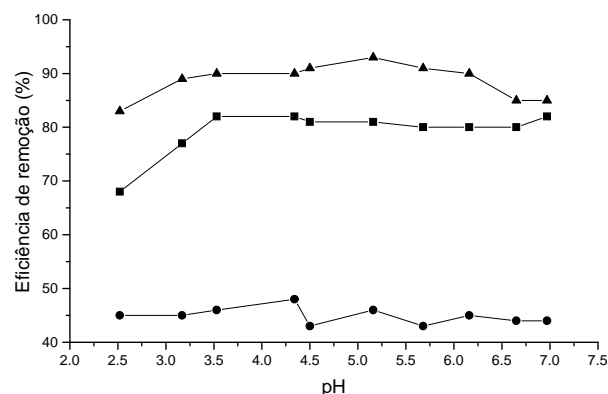
N é o número de dados.

nd – não determinado.

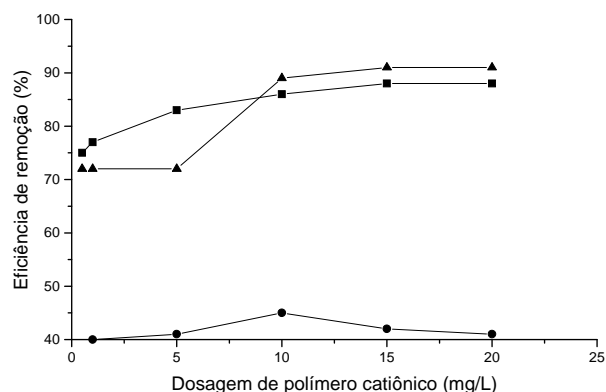
Ensaios utilizando polímero catiônico como coagulante

Polímero catiônico foi testado como coagulante devido a sua potencialidade de desestabilizar partículas carregadas negativamente pelos mecanismos de neutralização de cargas e formação de pontes. O desempenho do tratamento físico-químico por flotação utilizando polímero catiônico não foi influenciado pelo ajuste de pH, para faixa de pH entre 3,5 e 7,0. A remoção de DQO e de SST foi dependente da dosagem. Dosagens de polímero catiônico de 10 mg/L melhoraram significativamente a remoção de DQO e SST. Considerando os parâmetros da flotação, R acima de 30% não produziu nenhuma melhora no desempenho da flotação. Ødegaard (2001) comenta que a razão de recirculação é um parâmetro chave e que a eficiência da separação final por flotação, em plantas de tratamento terciário, decresce drasticamente quando a razão de recirculação cai para valores inferiores a 10%. Para a faixa de velocidade de flotação estudada, não foi observada influência no desempenho da flotação (Figura 1).

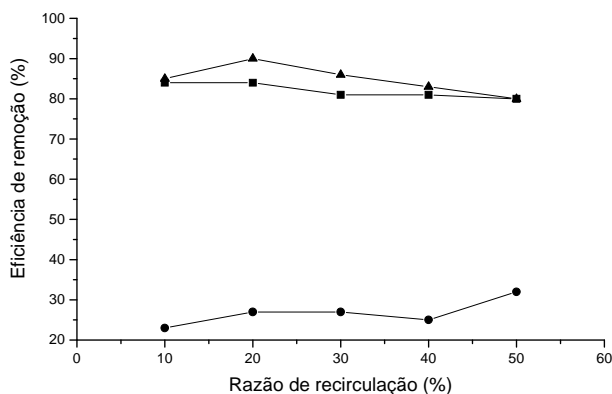
Sob as melhores condições experimentais: - sem ajuste de pH; - DPC de 10,0 mg/L; - R de 10-30% e; - V_{flot} de 5-25 cm/min foram obtidas eficiências de remoção de 81±5% de DQO_T, 88±4% de SST e 91±6% de turbidez. A remoção de 39±7% de PT foi atribuída à fração de fósforo incorporada aos sólidos. A fração solúvel da DQO e o nitrogênio amoniacal não foram removidos (Tabela 1). Vale mencionar que os ensaios utilizando polímero catiônico foram realizados com efluente anaeróbico extremamente concentrado (DQO_T de 1038mg/L a 1283 mg/L). Como polímero catiônico não foi eficiente na remoção da fração solúvel do fósforo, a adição de coagulante inorgânico é obrigatória.



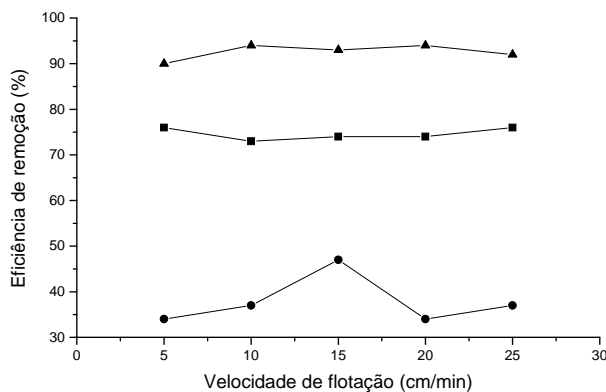
Avaliação do pH
DPC = 10 mg/L, R = 30%, V_{flot} = 10 cm/min



Avaliação da dosagem de polímero catiônico
Sem ajuste de pH, R = 30%, V_{flot} = 10 cm/min



Avaliação da razão de recirculação
DPC = 10 mg/L, V_{flot} = 10 cm/min



Avaliação de velocidade de flotação
DPC = 10 mg/L, R = 30%

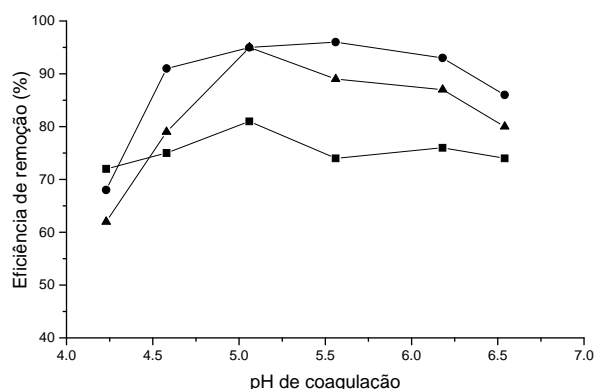
Figura 1: Avaliação das variáveis utilizadas no tratamento físico-químico por FAD utilizando polímero catiônico. ■DQO_T ●PT ▲SST

Ensaio utilizando cloreto férrico como coagulante e polímero catiônico com auxiliar de flotação

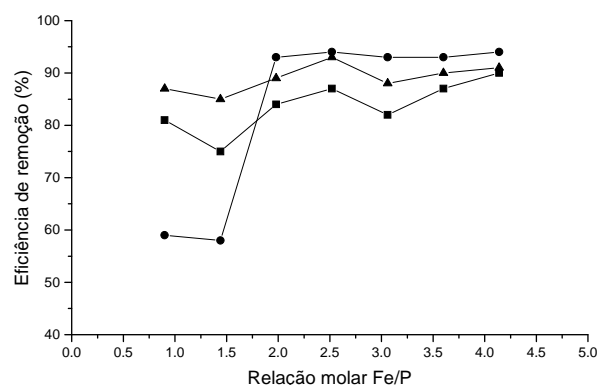
No processo de coagulação/floculação, a remoção de fósforo de águas residuárias envolve a incorporação do fosfato nos sólidos suspensos biológicos ou nos precipitados químicos e, na subsequente remoção destes sólidos. A precipitação do fosfato com utilização de cloreto férrico foi fortemente dependente do pH de coagulação e da relação molar Fe/P. Os melhores valores de remoção foram obtidos para pH_{coag} de 5,0-5,5 e relação molar Fe/P de 2,0-2,7 (Figura 2). O pH afetou fortemente as cargas superficiais e mobilidades eletroforéticas das partículas. Para valores de pH entre 5,0 e 5,5, αFeOOH apresenta carga superficial positiva, e partículas comuns em efluentes de estações de tratamento apresentam, principalmente, mobilidades eletroforéticas predominantemente negativas em uma faixa ampla de pH.

Para o valor teórico de relação molar Fe/P de 1, a eficiência de remoção de fósforo foi de 59%. Remoções de fósforo de 99% foram obtidas para relação molar Fe/P de 2,00-2,70, como resultado de reações de competição. Os valores de relação molar Fe/P obtidos são compatíveis com os apresentados na literatura para esgotos domésticos (Tabela 2).

Considerando os parâmetros de flotação, R acima de 30% não forneceram nenhuma melhoria no desempenho da flotação.



Avaliação do pH de coagulação
Relação Fe/P = 2,40, R = 30%, V_{flot} = 5 cm/min



Avaliação da relação molar Fe/P
pH_{coag} = 5,2-5,5, R = 30% e V_{flot} = 5 cm/min

Figura 2: Avaliação das variáveis utilizadas no tratamento físico-químico por FAD utilizando cloreto férrico. ■DQO_T ●PT ▲SST

Tabela 2: Comparação de relações molares Fe/P obtidas, usando cloreto férrico, no tratamento de águas residuárias.

Referência	Etapa de adição de FeCl ₃	pH	Relação Fe/P	Remoção de fósforo (%)
Esgotos sanitários				
Fytianos <i>et al.</i> (1998)	Efluente primário	4,5	2,71	97,6
	Efluente secundário	4,5	2,52	93,6
Penetra <i>et al.</i> (1999) ^a	Efluente secundário	5,3-6,1	2,56	96
Aiyuk <i>et al.</i> (2004) ^a	Esgoto bruto	7,0	2,41	80
Mistura de águas residuárias domésticas e industriais				
El-Bestawy <i>et al.</i> (2005) ^a	Efluente primário	6,0	6,07	75
Água residuária industrial				
<i>Este trabalho</i>	Efluente secundário	5,0-5,5	2,00-2,70	>99

^aCalculado dos trabalhos.

As características do floco formado pelo cloreto férrico não foram adequadas para flotação, uma vez que apresentaram velocidades ascensionais muito baixas, com decréscimo drástico do desempenho da flotação para velocidades de flotação acima de 5 cm/min. Entretanto, a adição de pequenas dosagens de polímero catiônico produziu flocos com elevada velocidade ascensional, permitindo a aplicação de velocidades de flotação maiores. O uso de cloreto férrico em associação ao polímero catiônico, auxiliar de flotação, é obrigatório para obtenção de elevada eficiência do tratamento em taxas de escoamento superficial maiores. Dessa forma, a flotação seria menos susceptível a variações na taxa de escoamento superficial. O mesmo comportamento foi observado por Reali *et al.* (2001), que consideraram uma característica positiva, pois possibilita a operação de unidades de flotação de alta taxa, permitindo a adoção de unidades mais compactas e, portanto, mais econômicas.

As melhores condições experimentais foram estabelecidas em: - pH de coagulação de 5,0-5,5; - relação molar Fe/P 2,0-2,7; - adição de pequenas dosagens de polímero catiônico como auxiliar de flotação (1,0 mg/L); - R de 10-30% e; - V_{flot} de 5-25 cm/min. Nessas condições foram obtidas eficiências de remoção de 73% de DQO_T, >99% de PT, 94% de SST e 98% de turbidez. A fração solúvel da DQO e o nitrogênio amoniacal não foram removidos. A remoção de 2 log de *E. coli* foi atribuída a remoção das bactérias associadas aos sólidos, pois elevada remoção de matéria suspensa e coloidal foi assegurada (Tabela 1).



CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios de FAD utilizando polímero catiônico como coagulante foram compatíveis com suas reconhecidas vantagens, como ampla faixa de pH, baixas dosagens e elevadas velocidades de flotação, entretanto a fração solúvel da DQO, o nitrogênio amoniacal e o fósforo não foram removidos. A utilização do cloreto férrico como coagulante e do polímero catiônico como auxiliar de flotação garantiriam elevadas eficiências de remoção de matéria orgânica, sólidos suspensos e fósforo. A remoção da fração solúvel da DQO está associada ao bom desempenho dos reatores anaeróbios.

O sistema de tratamento global composto por FAD primário, reatores UASB e pós-tratamento com FAD, utilizando cloreto férrico como coagulante e polímero catiônico como auxiliar de flotação apresentaria eficiências de remoção de 97% de DQO_T, 90% de O&G, >99% de PT, 70% de ST e 98% de SST, garantindo maior robustez do sistema de tratamento com relação aos padrões de lançamento em sistemas coletores de esgoto municipal (artigo 18 do Decreto Estadual nº 8.468, de 8 de Setembro de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro para realização desse projeto (processo n. 2002/03997-1), Céu Azul Alimentos Ltda pelo apoio operacional e a Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo pelo apoio institucional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AIYUK, S. *et al.* Removal of carbon and nutrients from domestic wastewater using a low investment, integrated treatment concept. *Water Res*, v.38, p.3031-3042. 2004.
2. EL-BESTAWY, E., HUSSEIN, H., BAGHDADI, H.H., EL-SAKA, M.F. Comparison between biological and chemical treatment of wastewater containing nitrogen and phosphorus. *J Ind Microbiol Biotechnol*, v.32, p.195-203. 2005.
3. FYTIANOS, K., VOUDRIAS, E., RAIKOS, N. Modelling of phosphorus removal from aqueous and wastewater samples using ferric iron. *Environ Pollut*, v.101, p.123-130. 1998.
4. ØDEGAARD, H. The use of dissolved air flotation in municipal wastewater treatment. *Water Sci Technol*, v.43, n.8, p.75-81. 2001.
5. PENETRA, R.G., REALI, M.A.P., FORESTI, E., CAMPOS, J.R. Post-treatment of effluents from anaerobic reactor treating domestic sewage by dissolved-air flotation. *Water Sci Technol*, v.40, n.8, p.137-143. 1999.
6. REALI M.A.P., PENETRA R.G., DE CARVALHO M.E. (2001) Flotation technique with coagulant and polymer application applied to the post-treatment of effluents from anaerobic reactor treating sewage. *Water Sci Technol*, v.44, n.4, p.205-212.